

10124  
221



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO DE PILAS DE VERTEDORES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A :

RAFAEL VAL SEGURA



DIRECTOR DE TESIS:  
M. I. Víctor Franco

México, D. F.

1992

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1.	INTRODUCCION .	. 1
2.	GEOMETRIA DE PILAS .	. 4
	2.1 Antecedentes .	. 5
	2.2 Planteamiento Experimental .	. 9
3.	PRESIONES SOBRE EL CIMACIO .	. 19
	3.1 Coeficiente de Contracción .	. 19
	3.2 Presiones .	. 22
4.	MEDICIONES .	. 43
	4.1 Obtención del Kp Expeimental .	. 46
	4.2 Obtención de Presiones .	. 47
5.	ANALISIS DE RESULTADOS .	. 56
	5.1 Análisis de Resultados Kp .	. 56
	5.2 Análisis de Resultados Presiones .	. 58
	5.3 Gastos .	. 61
6.	CONCLUSIONES .	. 63
	REFERENCIAS .	. 65

## 1. INTRODUCCION

La principal función de un vertedor de demasias o excedencias de una presa, es conducir el agua excedente que se encuentra en el vaso de almacenamiento, este volumen de agua en exceso se toma entre los niveles NAMO y NAME del embalse creado por la presa y es regresado de nuevo al río.

La obra de excedencias está compuesta por un conjunto de estructuras, que a continuación se describen :

Canal de acceso o de llamada, sirve para conducir el agua del vaso de almacenamiento a la estructura de control, no siempre se construye.

Estructura de control, generalmente se le llama vertedor. Esta estructura esta formada por un cimacio y puede ser controlado o descarga libre; con la primera se controlan las descargas por medio de compuertas que están sostenidas por pilas.

Rápida, es la estructura que sirve para encauzar el agua que vierte la estructura de control.

Estructura terminal, sirve para disipar la energía cinética que trae el flujo en la rápida. Para ésto se cuenta con dos maneras de hacerlo; una consiste en formar un salto hidráulico provocado por un cambio de pendiente, para ello se utiliza un tanque amortiguador y la segunda consiste en lanzar el chorro lo más lejos posible, para lograrlo se construye una cubeta deflectora.

Por último se tiene el canal de salida, que sirve para conducir el agua y regresarla al cauce; no siempre se construye.

La importancia del vertedor estriba en el hecho de que muchas de las fallas que en él se han visto ocurren para gastos menores al de diseño. Además, de que cuente con la suficiente capacidad, el vertedor debe ser hidráulica y estructuralmente adecuado y estar localizado de manera que las descargas no erosionen ni socaven el talón de la estructura terminal del mismo.

El diseño del cimacio ha sido ya muy estudiado por muchos autores en todo el mundo, unos lo ven desde el punto de vista teórico, otros tienden a hacerlo experimental y algunos combinando los dos; con lo cuál el problema que se llegase a tener para obtener su perfil óptimo se puede decir que se encuentra resuelto.

Pero en cuanto a lo que se refiere a las pilas que sostienen y separan a las compuertas, no hay muchos estudios, y los pocos que hay disponibles se refieren a pilas verticales pero en ellos no se menciona nada con respecto a pilas desplomadas.

El objetivo principal de este trabajo, es el de llegar a presentar los resultados que se lleguen a obtener de una serie de cambios que se realicen en la geometría de las pilas para ver la influencia de ésta en el funcionamiento hidráulico (coeficiente de contracción) y en la distribución de presiones sobre el cimacio. Estos cambios consistirán en modificar la planta y corte longitudinal de la pila en tres modelos físicos.

Con respecto al coeficiente de contracción se hará una comparación con las propuestas para las diferentes geometrías de las pilas y con las mediciones de las presiones se realizará una comparación entre ellos y los teóricos.

Por último en las conclusiones se dirá si es o no recomendable el que se cambie la geometría tridimensional de las pilas, sin que ello produzca hidráulicamente un mayor número de problemas de los que ya se tienen actualmente con las pilas verticales.

## 2. GEOMETRIA DE PILAS

Los componentes de una pila se muestran en las fig 1 o 2.

- 1.- TAJAMAR : Punto del extremo de aguas arriba de la pila , que separa el flujo que incide sobre ella , el cual puede ser vertical o inclinado.
- 2.- LONGITUD : Distancia existente entre el tajamar y la cola de la pila.
- 3.- NARIZ : Parte que forma el perfil hidrodinámico de la pila.
- 4.- CUERPO : Parte central de la pila.
- 5.- COLA : Parte de aguas abajo de la pila, en algunos casos se llega a continuar con el muro de separación entre los canales de descarga del vertedor.

## 2.1 Antecedentes

En 1868 Helmholtz propuso estudiar el problema de una corriente líquida en movimiento plano, permanente e irrotacional, con velocidad constante y paralela a un eje recto X, obstaculizada por una placa vertical AB, ver fig 3, en donde se puede observar que las líneas de corriente sufren una modificación en su trayectoria ya que en el campo C el líquido se mueve, quedando substituido por la región M en donde según su teoría el líquido no se mueve.

Kirchhoff (1872) y Lord Rayleigh (1873), respectivamente, resolvieron el problema en los casos de placa normal a la corriente y de placa inclinada. Bobileff (1881) realizó sus investigaciones con un obstáculo formado por dos placas con un ángulo diedro bisectado por el eje X.

Levi-Civita (1906) resuelve el problema con un obstáculo de forma curvilínea cualquiera, fig 4, estableciendo así la teoría de la estela, que a continuación se explica brevemente. Las partículas sufren un paro momentáneo (O) para posteriormente fluir hacia la derecha (OA) o hacia la izquierda (OB) siguiendo una trayectoria denominada r<sub>1</sub> o r<sub>2</sub>, respectivamente. Al sobrepasar las partículas los puntos A y B se separan de la pared y forman lo que se llama líneas de separación S1 y S2.

Si se aplica el teorema de Bernoulli ya sea a la línea S1 o S2 y se acepta la ausencia de fuerzas de masa, se tiene:

$$p + \frac{v^2}{2g} = \text{cte} \quad (1)$$



donde  $p$  es la presión y  $v$  la velocidad; ahora si se tiene un punto cualquiera  $Q$  localizado en las líneas  $S1$  o  $S2$ , la ecuación 1 se vuelve válida para cualquier dirección de análisis, por tanto si ahora se consideran las condiciones tanto de la región  $C$  que es una zona de corriente y de la región  $M$  que es una zona muerta; aplicando Bernoulli entre  $C$  y  $M$  se tendrá:

$$P_0 + \frac{V_0^2}{2g} = P_Q + cte \quad (2)$$

por lo tanto se concluye que  $V = cte$ .

Luego las líneas  $S1$  y  $S2$  son de velocidad constante las cuales separan las regiones  $C$  y  $M$ . Por lo tanto esta última no es una zona muerta absoluta, ya que en ella se desarrolla el fenómeno denominado estela, que es provocado por la rugosidad de la pared con el flujo y la separación de las líneas de flujo con el obstáculo. Para explicar este fenómeno, considérese el flujo sobre el cuerpo, fig 5, en donde las partículas del fluido son aceleradas de  $D$  a  $E$  en la mitad de aguas arriba, y desaceleradas de  $E$  a  $F$  en la mitad de aguas abajo; por lo tanto la presión decrece de  $D$  a  $E$  y se incrementa de  $E$  a  $F$ ; la presión externa causa un movimiento en sentido contrario, provocando una turbulencia local, originando una succión en la parte posterior del obstáculo, en donde se genera la zona conocida como estela.

Lo anterior se puede explicar como una similitud con las aplicaciones de los principios aerodinámicos utilizados para el diseño de alas de aviones, con ello podría darse una forma racional para las pilas de los vertedores. Sin embargo se señala que este tipo de pilas no se han estudiado desde el punto de vista hidrodinámico, por lo que no debe esperarse gran cosa de las construidas sobre vertedores.

Pero si se considera que el escurrimiento del agua alrededor de una pila se reduce al escurrimiento de una corriente plana sobre un obstáculo; por lo que la aplicación de los resultados que se obtuvieron en la aerodinámica de las alas de avión, podrían aplicarse en el estudio de diseño de las pilas. Con ello nos darían formas mas racionales de obstáculos que produjeran la mínima perturbación en una corriente.

En lo que a la hidrodinámica se refiere se ha establecido que el contorno de aguas arriba de las pilas debe funcionar como un cortador del flujo, poniéndole poca importancia al lado de aguas abajo, suponiendo que esto no influye en el valor del coeficiente de descarga  $C$ , lo cual puede ser discutible ya que el funcionamiento que se tenga cambia dependiendo de la forma que vaya a adoptar la pila. Según Lelivsky en el extremo de aguas arriba del obstáculo en el agua, la energía potencial del agua se convierte en energía dinámica y en el extremo de aguas abajo, las condiciones son inversas, la energía dinámica se convierte en energía potencial, por lo que las perturbaciones en el extremo de aguas arriba son menores que en el extremo de aguas abajo.

En la fig 6, se muestran las secciones de aguas arriba y de aguas abajo de las pilas usadas en diferentes proyectos construidos en Egipto, entre los años de 1845 y 1944. En donde puede observarse que los primeros diseños tomaban únicamente el perfil de aguas arriba teniendo una forma hidrodinámica y el de aguas abajo en forma rectangular, no siendo hasta 1926 que se empieza a cambiar esta concepción.

Las experiencias de L. Escande señalan que el perfil más eficiente, desde el punto de vista hidrodinámico, es el perfil biconvexo propuesto por Joukowski, ya que las contracciones del flujo son poco apreciables; no reportando valores numéricos de coeficientes de contracción o de descarga, ver fig 7.

Como complemento a la geometría de las pilas, Lellavsky propone una relación para determinar el espesor de ellas, sin especificar la forma.

$$e = (0.21 + (2 H - S) / 152.4) S \quad (3)$$

donde

- e espesor de la pila , en m
- H carga de diseño del vertedor , en m
- S separación entre pilas , en m

Considerando que la ecuación 3 da el máximo espesor de la pila, pudiendo llegar a reducirse de acuerdo a las solicitaciones estructurales.

En la actualidad se encuentra una gran variedad de diseños hidrodinámicos del extremo de aguas arriba de las pilas, entre ellos los recomendados por el cuerpo de Ingenieros U.S.A. (WES), Nagler , Rehbock, Torres H. , Creager , y otros; en la fig 8 se indican algunos de los perfiles más usados en las pilas de vertedores.

El cuerpo de Ingenieros de U.S.A. (WES) recomienda usar los perfiles a, f, g y h; los que tienen el mejor diseño son a y g ya que provocan menos perturbaciones en el flujo y el f es el que provoca mayor perturbación.

Los perfiles b, c y g son propuestas por Creager y Justin, según ellos siendo el mas recomendable es el c, por ser el más hidrodinámico y tener el mayor desarrollo de nariz; el g es el menos recomendable.

Nagler propone usar los perfiles d y i, siendo el segundo al que se le pega más el flujo y las contracciones son inapreciables, pero el problema que se presenta consiste en que sea de construcción difícil.

Rehbock reduce las contracciones del flujo con un mayor desarrollo de la nariz, para ello propone utilizar el perfil e.

En base a lo anterior se tiene que la geometría de las pilas sobre vertedores, debe contar con un diseño que provoque las mínimas perturbaciones sobre el flujo de agua, es decir que sea hidrodinámico y con ésto lograr que el punto de separación del fluido y la pared sólida de la pila se desplacen hacia aguas abajo.

## 2.2 Planteamiento Experimental

Si se considera que en cualquier punto de la corriente la energía cinética se expresa por  $v^2/2g$  y la energía potencial en un escurrimiento libre, se representa por la altura de la superficie del agua, medida a partir de un nivel de referencia, la pérdida de energía potencial entre dos secciones, (I) y (II), ver fig 9, es igual a la diferencia de nivel "h" de la superficie del agua entre esas dos secciones; la pérdida de energía cinética correspondiente se calcula como una función de la diferencia de velocidades de las dos secciones consideradas; por lo tanto resulta:

$$h = \left( \left( \frac{\alpha}{2g} \right) \left( \frac{Q}{CA} \right)^2 \right) - \left( \left( \frac{\alpha}{2g} \right) \left( \frac{Q}{a} \right)^2 \right) = \left( \left( \frac{\alpha Va^2}{2g} \right) \left( \left( \frac{a}{CA} \right)^2 - 1 \right) \right) \quad (4)$$

donde

- h pérdida de energía entre las secciones I y II , en m
- $\alpha$  coeficiente de Coriolis
- g aceleración de la gravedad , en  $m/s^2$
- Q gasto considerado , en  $m^3/s$
- C coeficiente de contracción del flujo
- A área hidráulica en la sección II , en  $m^2$
- a área hidráulica en la sección I , en  $m^2$
- Va velocidad media en la sección I , en  $m/s$

Como parte de la energía se disipa, la pérdida de energía total es ligeramente mayor que el cambio de nivel del agua, de donde se tiene que

$$h = \left[ \left( \frac{\alpha v_a^2}{2k^2 g} \right) \left( \left( \frac{a}{CA} \right)^2 - 1 \right) \right] \quad (5)$$

donde :

$K \leq 1$ , es un coeficiente empírico.

Si se omite  $\alpha$  y  $K$ , se obtiene la fórmula de Gautey (1809) :

$$h = \left( \frac{v_a^2}{2g} \right) \left( \left( \frac{a}{CA} \right)^2 - 1 \right) \quad (6)$$

Omitiendo  $\alpha$  y  $C$ , se tiene la fórmula de Du Boys (1889) :

$$h = \left[ \left( \frac{v_a^2}{2k^2 g} \right) \left( \left( \frac{a}{A} \right)^2 - 1 \right) \right] \quad (7)$$

Si se desprecia  $K$  y se consideran  $\alpha$  y  $C$ , se tiene la fórmula de Flamet (1909):

$$h = \left[ \left( \frac{\alpha v_a^2}{2g} \right) \left( \left( \frac{a}{CA} \right)^2 - 1 \right) \right] \quad (8)$$

Si se quiere aplicar las teorías hidrodinámicas en pilas sobre vertedores, L. Escande probó un perfil tipo Joukowsky y por razones constructivas, suprimió la extremidad de aguas abajo demasiado delgada, y proyectó el perfil sobre la superficie del cimacio del vertedor. De ahí se obtuvieron los mejores perfiles ya que se reducía a un mínimo las perturbaciones en la lámina vertiente por esas pilas, posteriormente observó que si no se cambiaba el valor del coeficiente de descarga ni la regularidad del escurrimiento, se puede suprimir la mitad de aguas abajo de las pilas, ya que en la zona correspondiente se forma una estela aireada, limitada por las paredes líquidas.

Probando diferentes perfiles de pilas, como los que se muestran en la fig 10, Escande encontró que los valores de las pérdidas varían con el gasto, como se puede observar en la fig 11, cada uno de los números que aparecen en la figura 11 esta referido al tipo de pila mostrado en la figura 10.

Además L. Escande observó que si se mantiene un cierto gasto y las pilas tienen una terminación redondeada en su extremo se presenta un aumento notable en las pérdidas de carga que se tiene. Este fenómeno se crea por la presencia de los vórtices alternos que nacen al final de las pilas; si se llegan a tener dos pilas en un mismo canal los vórtices que se generaron en el extremo de las pilas se defasan unos con respecto a otros; provocando que se enrolen primero hacia el interior del canal y después hacia el exterior, con lo cual se provoca que se genere una oscilación de la superficie libre del agua que puede resultar notable y con ésto provocar problemas en el canal.

También realizó ensayos comparativos de erosiones, ver fig 12 ésto lo llevó a observar que aún así las pilas aerodinámicas mantienen una cierta ventaja sobre las otras; pero no es tan marcada como en lo que concierne a las pérdidas de carga.

Además menciona que una solución excelente sería que se construyeran las pilas adoptando la forma de barco, con la nariz en desplome, las cuales hacen que la supresión de la superficie libre del escurrimiento, en el centro del claro entre pilas, sea menor al observado en pilas de tajamar vertical; otra recomendación es la de construir el tajamar siguiendo la trayectoria de la línea equipotencial que toca el inicio de la curva del cimacio en el paramento de aguas arriba, ver fig 13.

Según Nagler el perfil más óptimo es el de la fig. 8.1 , a la cual se pega la vena líquida y es equivalente a una de ensanchamiento recto de menos de  $30^{\circ}$ .

Como se puede observar las formas de perfiles más usadas, son las ojivales con radios de curvatura de 1 a 5 veces el espesor de la pila, otra, la semicircular ya que es similar a la ojival con radios de curvatura  $r = e$ .

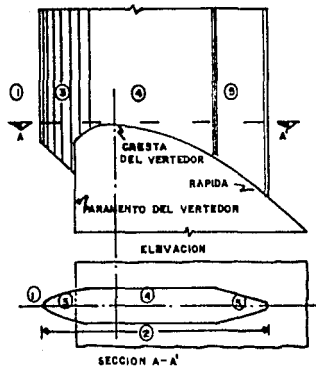


FIG 1 Componentes de una pila vertical

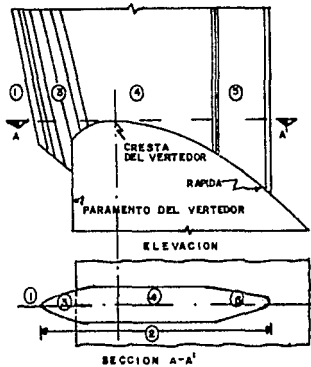


FIG 2 Componentes de una pila desplomada

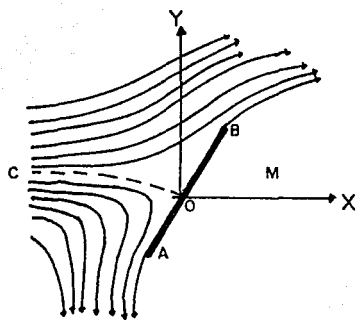


FIG 3 Placa en una corriente

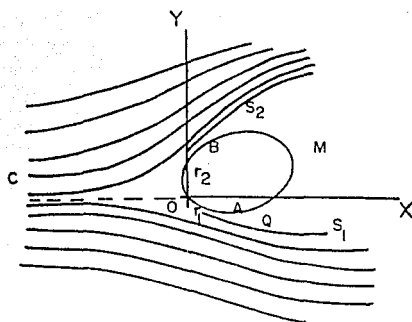


FIG 4 Obstáculo curvilíneo en la corriente

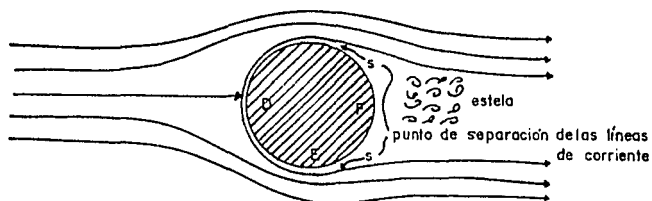


FIG 5 Separación de las líneas S<sub>1</sub> y S<sub>2</sub>



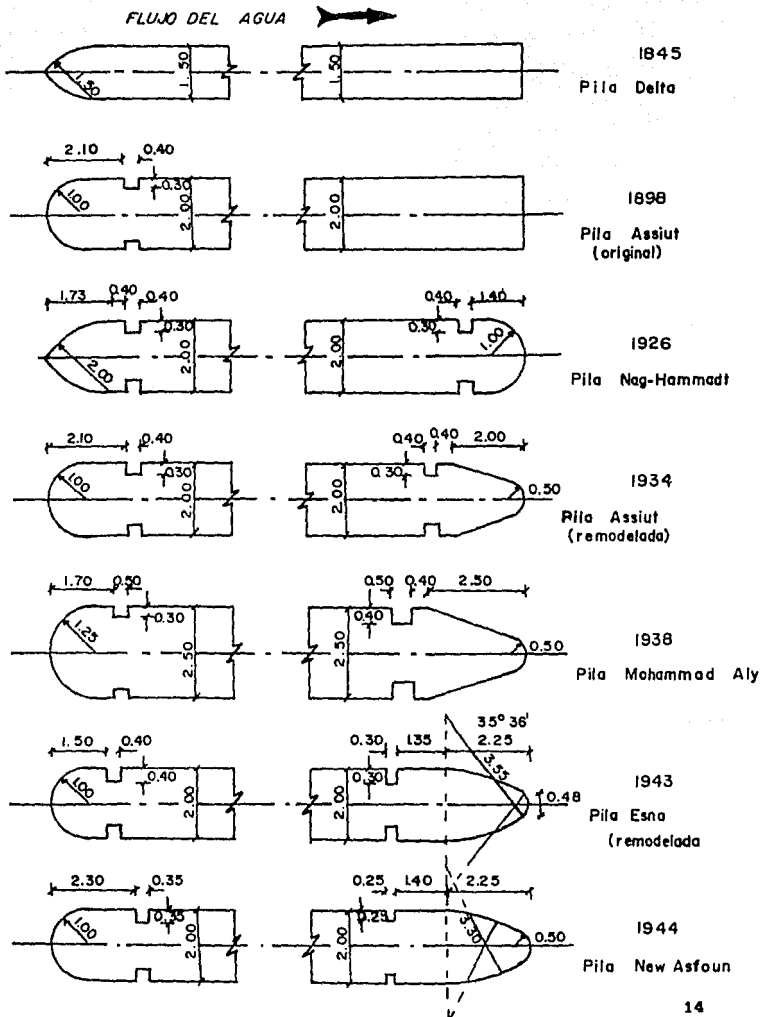


FIG 6 Pilas usadas en diferentes proyectos

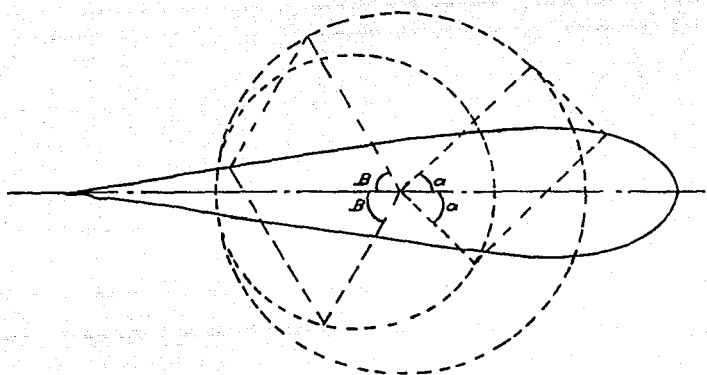


FIG 7 Perfil hidrodinámico propuesto por Joukowski

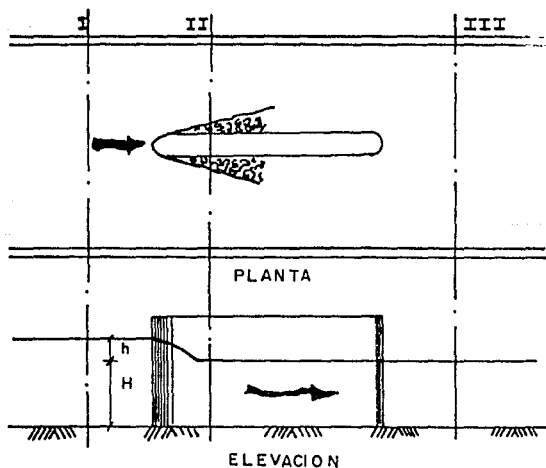


FIG 9 Condiciones de funcionamiento hidráulico de una pila en una corriente

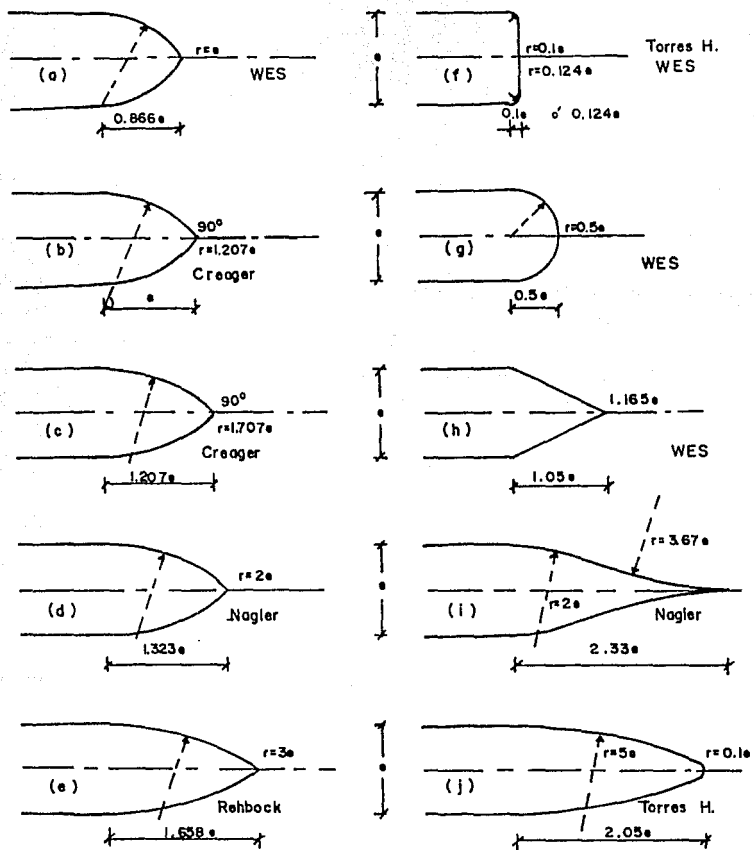
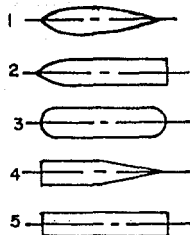


FIG8 Difentes perfiles de aguas arriba usadas en pilas



FIGIO Perfiles de pilas ensayadas por L. Escande

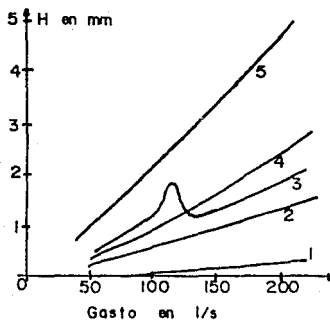


FIG II Pérdidas de carga, para cada tipo de perfil, ensayadas por L. Escande



FIG 12 Isocurvas de erosión con diferentes pilas

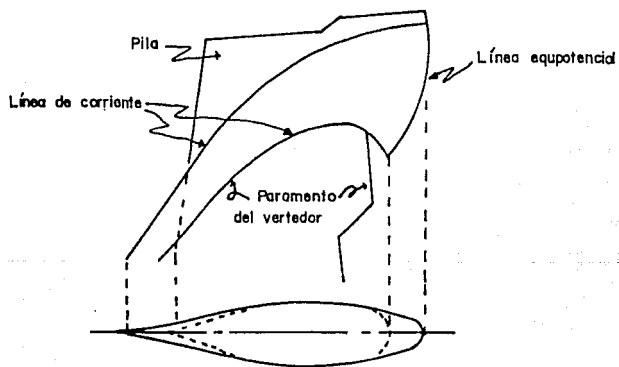


FIG 13 Sección y planta de un perfil tipo Joukowski, ensayada por L. Escande

### 3. PRESIONES SOBRE EL CIMACIO

En este capítulo se expone como se obtienen el coeficiente de contracción "Kp", producido por la presencia de una pila, y las presiones que se generan, en forma teórica, sobre el perfil del cimacio.

#### 3.1 Coeficiente de Contracción " Kp "

En la fig 14 se muestra la contracción que se llega a generar en el flujo de agua con dos formas de pila; como se puede observar, en la fig 14a se genera una mayor contracción del flujo que el que llega a presentarse en la fig 14b.

En la fig 15 se indican los componentes de una obra de excedencias.

La capacidad de descarga de un vertedor es función de sus dimensiones, la carga real sobre la cresta y de su geometría; todos estos factores se consideran que están tomados en cuenta dentro del coeficiente de descarga C, hay que indicar que estas estructuras pueden funcionar con cresta libre o controlada (con pilas para compuertas); la capacidad de descarga para descarga libre (también se considera la posibilidad de que la compuerta esté completamente abierta), está dada por la fórmula :

$$Q = C L_e H^{3/2} \quad (9)$$

donde

- Q capacidad de descarga , en  $\frac{m^3}{s}$   
 C coeficiente de descarga , en  $\frac{1}{m}$   
 L<sub>e</sub> longitud efectiva de la cresta , en m  
 H carga total sobre la cresta , en m

Siendo la cresta la sección de control, la longitud de ésta es aquella por donde escurre el gasto del vertedor; si existen pilas sobre la cresta y hay estribos en el vertedor causan contracciones en el flujo, con lo que disminuye la longitud total de la cresta; por lo que la efectiva queda definida por

$$L_e = L - 2 [(N K_p) + K_a] H \quad (10)$$

donde

- L longitud total de la cresta , en m  
 N número de pilas  
 K<sub>p</sub> coeficiente de contracción por efecto de la pila  
 K<sub>a</sub> coeficiente de contracción por efecto del estribo

La forma de obtener el valor del coeficiente de contracción por efecto de pila es variable ya que se encuentra en función de la forma, posición y longitud de la nariz, la condición de carga, la profundidad de llegada del flujo y la operación de las compuertas adyacentes; así, por ejemplo, un valor aproximado dado por Creager y Justin (ref 6) es de  $0.035 \leq K_p \leq 0.1$  . Estos valores son para pilas con un espesor de aproximadamente un tercio de la carga sobre la cresta con todas las compuertas abiertas; cuando se presenta que una compuerta está abierta y las adyacentes cerradas, los valores pueden aumentar hasta 2.5 veces los valores señalados.

En las figs 16 a la 20, se muestran los valores de los coeficientes de contracción que se presenten por efecto de las pilas en los vertedores, y que son recomendados por diferentes autores.

En los coeficientes recomendados por Creager y Justin ; puede verse que para un mismo perfil, con un espesor igual a un tercio de la carga de diseño, que si se combina con la longitud de la pila hacia aguas arriba,  $K_p$  disminuye debido a que se presenta una mejor condición de entrada del agua, ver fig 16.

Los valores recomendados por Torres H (ref 7) que se muestran en la fig 17 pueden servir para diseños preliminares, ya que éste indica la variación que pueden tener por la posición relativa del vertedor o por la altura de la carga sobre el cimacio.

La variación del coeficiente de contracción para pilas en vertedores con paramento de aguas arriba vertical y diferentes longitudes de pila se muestra en la fig 18, las condiciones que limitan su uso son la velocidad de llegada que debe ser despreciable y que la profundidad de llegada  $p$  sea mayor de  $1.333H_d$  (no existe canal de llamada).

Para el U. S. Army Engineers la variación del coeficiente depende de la forma del perfil de la nariz de la pila, como se indica en la fig 19, recomendando mejor las tipo 2 y 3, la tipo 4 provoca presiones negativas sobre la pila, las cuales se transmiten al vertedor.

Tambien estos mismos autores presentan la variación de los valores del coeficiente para pilas tipo 2, ver fig 20, coincidiendo la nariz con el paramento de aguas arriba del vertedor y para profundidades de llegada  $p \geq 1.333H_d$ . Si se trata de otro tipo de pilas para las condiciones anteriores, se puede interpolar con ayuda de las figs 18, 19 y 20.



El efecto de la presencia de la pila en el perfil del flujo sobre el vertedor, se muestra en la fig 21. En la primera fig 21a se muestra el perfil de la superficie libre del agua en vertedores sin pilas, la 21b corresponde al perfil de la superficie libre del agua al centro del claro entre dos pilas y la 21c indica el perfil de la superficie libre del agua a lo largo de la pila (WES, tipo 2), en esta figura se puede ver un "chipote" que es provocado por el efecto de la contracción del flujo.

Para poder llegar a obtener los valores que corresponden al coeficiente de contracción por efecto de pila "Kp" se usó la ec 10 y se consideró que Ka = 0 , por los motivos que se explicarán en el cap 4, llegando a

$$K_p = \frac{L - L_e}{2 N H} \quad (11)$$

Con ayuda de la ec 11 y en ella se sustituyen los datos correspondientes se podrá obtener teóricamente el valor del coeficiente de contracción "Kp".

### 3.2 Presiones

En los primeros vertedores las crestas de los cimacios tuvieron formas que se basaron usualmente sobre una parábola simple, la cuál era diseñada para que se ajustara a la trayectoria del perfil del agua cuando ésta cae libremente; el que inició este tipo de ensayos fue Bazin, quien realizó las primeras investigaciones a fondo sobre el diseño de un cimacio y con lo cuál creó así el perfil Bazin; teóricamente éste no presentaría presiones negativas sobre la cresta.

Sin embargo en la actualidad se sabe que existe una cierta fricción que es provocada por una cierta rugosidad que se presenta sobre la superficie del vertedor y el flujo de agua; con la cuál se ha observado que no se puede evitar que se presenten las presiones negativas.

Para poder llegar a hacer una buena selección sobre el perfil adecuado, se deben considerar como objetivo el evitar una serie de problemas como son, por ejemplo, las presiones negativas, así como llegar a tener una eficiencia hidráulica máxima, además de que sea estable y económico. Así el perfil Bazin con el tiempo se ha tenido que ir modificando y por ello se han estado realizando desde entonces nuevos experimentos, con lo cuál se han propuesto para fines de diseño muchos otros perfiles, entre ellos destacan el perfil Creager, el Lane-Davis, el Scimmi, el Escande, etc.

El U S Army Corps of Engineers es quién más investigación a hecho sobre los perfiles, con lo cuál ha desarrollado varias formas de vertedores standar en su Waterways Experimental Station (WES). Tales perfiles se muestran en la fig 22.

El perfil del vertedor, de la cresta hacia aguas arriba, que fue diseñado por el WES se representa por la ecuación siguiente

$$X^n = K H_d^{n-1} Y \quad (12)$$

donde

X, Y coordenadas del perfil con origen en el punto más alto de la cresta, ver fig 22.

H<sub>d</sub> altura de diseño, excluyendo la altura de velocidad.

K, n parámetros cuyo valor depende de la pendiente de la cara aguas arriba del cimacio, en la tabla siguiente se indican los valores.

PENDIENTE DE LA CARA

AGUAS ARRIBA

K

n

Vertical	2.000	1.850
3 a 1	1.936	1.836
3 a 2	1.939	1.810
3 a 3	1.837	1.776

El perfil del cimacio de la cresta hacia aguas arriba esta definido por dos arcos de circulo.

Como se dijo ya con anterioridad si el diseño del perfil del vertedor se realiza exactamente conforme a la forma que adopta el perfil del agua de una caída libre, la presión que se puede generar sobre la cresta del vertedor debería de ser igual a la hidrostática, sin embargo ello no ocurre debido a que el perfil del cimacio tiene una curvatura convexa que hace que la presión sea menor a la hidrostática (Chow, ref2) y aún se pueden llegar a alcanzar valores negativos.

Como se sabe generalmente los vertedores se operan para alturas diferentes a la de diseño; la presión aumenta si se tiene una altura menor a la de diseño y disminuye si se tiene una altura mayor a la de diseño, en el primer caso la vena se pega mas al perfil y en el segundo se separa, con lo cual se puede llegar a presentar presiones negativas. El WES obtuvo por medio de ensayos las distribuciones de presión sobre la cresta de un vertedor con y sin pila para tres diferentes relaciones de altura, como se muestra en las figs 23, 24 y 25.

La presión que se llega a generar sobre el vertedor se puede obtener mediante muchos métodos como son, por ejemplo, un método numérico, gráficamente por análisis de una red del flujo, o instrumentalmente por una analogía electrónica; sin embargo en este trabajo para obtener las presiones sobre el vertedor se aplica el principio de la energía.

Para el perfil de la fig 26 se quiere obtener tanto el perfil del flujo del agua, como las presiones que llegasen a presentar teóricamente sobre él, para ello supóngase que se tiene un perfil del cimacio que se comporta según la ec 12.

En la práctica el perfil puede continuar de dos maneras diferentes (ver figs 27 y 28).

1.- Si después del perfil continua una curva (con un radio  $r$ ) se tiene ahí un punto P.C. y después se presenta el punto P.T. en donde inicia la rápida con pendiente  $S_0$ , ver fig 27.

2.- Si después del perfil se presenta inmediatamente la rápida con lo cual se tiene el punto P.T. y una pendiente  $S_0$  constante, ver fig 28.

Para poder obtener el perfil del flujo de agua que se llegase a presentar, primero se procederá a definir las coordenadas rectangulares  $(x,y)$  de los puntos de interés a todo lo largo del perfil del vertedor; luego ellas se transformarán a coordenadas polares  $[r,\theta]$  para obtener el radio de curvatura que corresponde a cada uno de los puntos. Calculado el radio de curvatura se procederá a aplicar la ecuación de la energía a partir del punto  $[0,0]$  (cresta del cimacio) hacia aguas abajo; con esto se llega a obtener el tirante perpendicular al perfil del vertedor en cada uno de esos puntos.

- Obtención de las coordenadas  $r$  y  $\theta$

Dadas las coordenadas  $(x,y)$  se determinan las coordenadas  $[r,\theta]$  de la manera siguiente

$$X = r \cos\theta' \quad ; \quad Y = r \sin\theta' \quad (13)$$

$$\theta' = 90^\circ - \theta \quad (14)$$

donde  $\theta$  es el ángulo que forma la tangente de cada punto con la horizontal

De la ec 12 se tiene que :

$$Y = \frac{1}{K H^{n-1}} X^n \quad (15)$$

Si se hace que

$$\alpha = \frac{1}{K H d^{n-1}} \quad (16)$$

La ec 15 queda de la forma siguiente :

$$Y = \alpha X^n \quad (17)$$

Sustituyendo las ecs 13 y 14 en la 17; se llega a

$$r \text{ Sen}\theta' = \alpha (r \text{ Cos}\theta')^n \quad (18)$$

Por lo tanto despejando r de la ec 18 se tiene que

$$r = \frac{\text{Sen}\theta'}{\alpha \text{ Cos}\theta'^n} \quad (19)$$

Como se puede observar con las coordenadas [x,y] se pueden obtener las coordenadas [r,θ] a todo lo largo del perfil en estudio. Obtenidas estas coordenadas se procede a calcular el tirante perpendicular del flujo; éste se obtendrá aplicando la ecuación de la energía como a continuación se muestra.

Cuando se presente el caso de la fig 27, que tiene un radio "r" constante y una deflexión Δ entre el punto Pc y PT, únicamente se irá cambiando el valor de la tangente en cada punto.

- Obtención del tirante "d" para el perfil del flujo, ver fig 29.

Para calcular el tirante  $d_0$ , ver fig 29, se procede a hacerlo con ayuda de las relaciones de  $H_{Hd}$  y  $X_{Hd}=0$  y con ellas se ve el valor que le corresponde a  $Y_{Hd}$ , ver fig 21; obtenido este resultado se despeja  $Y$  siendo este igual a  $d_0$ . Así, por ejemplo, de la fig 14-8 ref 2 se tiene que para  $H_{Hd}=1$  y  $X_{Hd}=0$  se tiene  $Y_{Hd}=0.805$ , y despejando  $Y$  que

$$Y = d_0 = (0.805)(Hd) \quad (20)$$

Ya que se tiene el tirante  $d_0$  se procederá a obtener también la velocidad en ese punto, suponiendo que la sección es rectangular, de la manera siguiente

$$Q = V A \quad ; \quad V_0 = Q / A$$

$$V_0 = \frac{Q}{d_0 \cdot B} \quad (21)$$

Aplicando la ecuación de la energía entre los puntos 0 y 1, se tiene que

$$Z + d_0 + \frac{V_0^2}{2g} = d \cos\theta + \frac{V^2}{2g} - \frac{V d}{g r} \quad (22)$$

Si la velocidad " $V$ " se deja en función del gasto " $Q$ " y del área " $d \cdot B$ " y se sustituyen ambas en la ec 22 y se llega a

$$Z + d_0 + \frac{V_0^2}{2g} = d \cos\theta + \frac{Q^2}{d^2 B^2 2g} - \frac{Q^2 d}{d^2 B^2 g r} \quad (23)$$

Para llegar a obtener el tirante  $d$  en el punto de interés, se multiplica toda la ec 23 por  $d^2$ , con lo cual queda

$$d^2 \left[ Z + d_0 + \frac{V_0^2}{2g} \right] = d^3 \cos\theta + \frac{Q^2}{B^2 2g} - \frac{Q^2 d}{B^2 g r} \quad (24)$$

De esta última ecuación se llega a

$$d^3 \cos\theta - d^2 \left[ Z + d_0 + \frac{V_0^2}{2g} \right] - d \frac{Q^2}{\beta g r} + \frac{Q^2}{\beta 2g} = 0 \quad (25)$$

La ec 25 es de tercer grado, con dos raíces positivas y una negativa y de ella se obtiene "d" hasta el punto Pc (si se tiene) o PT

Para el caso de la fig 27 se obtiene d entre el punto Pc hasta PT con la ecuación siguiente

$$d^3 \cos\theta - d^2 \left[ Z + d_0 + \frac{V_0^2}{2g} \right] + d \frac{Q^2}{\beta g r} + \frac{Q^2}{\beta 2g} = 0 \quad (26)$$

Para después del punto PT el tirante d se obtiene con (ver figs 27 y 28)

$$d^3 \cos\theta' - d^2 \left[ Z + d_0 + \frac{V_0^2}{2g} \right] + \frac{Q^2}{\beta 2g} = 0 \quad (27)$$

Dependiendo de las condiciones que se estén analizando el valor de d se calcula con las ecs 25, 26, 27 en el punto deseado para formar el perfil del flujo.

Posteriormente que se obtuvo el tirante, se pasa a obtener la presión correspondiente en ese punto.

**-Cálculo de las presiones**

Para obtener la carga de presión se usa la ecuación siguiente

$$h_p = d \cos\theta \pm \frac{v^2 d}{g r} \quad (28)$$

Si la velocidad se pone en función del gasto y el área, la ec 28 se expresa como

$$h_p = d \cos\theta \pm \frac{Q^2 d}{d^2 B^2 g r} \quad (29)$$

La cual se reduce a

$$h_p = d \cos\theta - \frac{Q^2}{d B^2 g r} \quad (30)$$

Con la ec 30 se obtiene " hp " hasta Pc o PT. Entre los puntos Pc y PT hp se calcula con

$$h_p = d \cos\theta + \frac{Q^2}{d B^2 g r} \quad (31)$$

Después del punto pt " hp " se calcula con

$$h_p = d \cos\theta \quad (32)$$



ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

```
10 REM PROGRAMA PARA LA OBTENCION DE TIRANTES Y PRESIONES:CLS
20 PRINT " ESTE PROGRAMA OBTIENE EL PERFIL DEL FLUJO CON UN CIMACIO TIPO CREAGER"
30 PRINT "          n          n-1          "
40 PRINT "          x = K Hd      Y      "
50 FOR U = 1 TO 5: PRINT : NEXT U
60 PRINT " EL PROGRAMA SE DIVIDE EN CINCO PARTES PRINCIPALES "
70 FOR U= 1 TO 2 : PRINT :NEXT U
80 PRINT "1.-  DATOS GENERALES": BEEP : PRINT
90 PRINT "2.-  CALCULO HASTA PC O PT": BEEP : PRINT
100 PRINT "3.-  CALCULO DE PC A PT SI SE TIENE UNA CURVA": BEEP : PRINT
110 PRINT "4.-  CALCULO APARTIR DE EL PUNTO PT": BEEP : PRINT
120 PRINT "5.-  CALCULO DE EL TIRANTE Y PRESIONES": BEEP : PRINT
130 FOR U=1 TO 5000:NEXT
140 FOR U=1 TO 2500:NEXT : CLS : D=1 : F=0:AB=1
150 REM SUBROUTINA OBTENCION DE DATOS
160 PRINT "          DATOS GENERALES          ; primera parte"
170 FOR U=1 TO 10 : PRINT : NEXT U
180 INPUT "          NOMBRE DE LA PRESA " ;A7$:PRINT
190 INPUT "          DESPLOME " ;A6$:PRINT
200 INPUT "          CARGA DE DISENO Hd = " ;H : PRINT
210 INPUT "          CARGA DE ESTUDIO H = " ;H1: W=H1/H : PRINT
220 INPUT "          VALOR DE EL PARAMETRO K= " ;K : PRINT
230 INPUT "          VALOR DE EL PARAMETRO n= " ;N : M1=N-1 : PRINT
240 CLS ;FOR U=1 TO 10 : PRINT :NEXT U
250 PRINT "TU ECUACION ES : "
260 FOR U = 1 TO 5 : PRINT : NEXT U
270 PRINT "          " ;N ; "          " ;M1
280 PRINT "          x = " ;K ; "          " ;H ; "          Y"
290 FOR U = 1 TO 2500: NEXT U
300 FOR U = 1 TO 10 : PRINT :NEXT U
310 INPUT "          TIENES UNA CURVA DESPUES DE EL PERFIL CREAGER ? , SI ES ASI
MARCA UN 1 ; SI NO MARCA UN 2 " ;S : PRINT
320 FOR U=1 TO 10 : PRINT : NEXT U
330 FOR U=1 TO 100:NEXT : FOR U=1 TO 10 : PRINT :NEXT U
340 IF S=1 THEN GOTO 350 ELSE GOTO 390
350 INPUT "CUANTOS VALORES SON HASTA EL PUNTO PC (sin contar el punto 0,0 e incl
uyendo a PC " ;A :PRINT
360 INPUT "CUANTOS VALORES SON DE PC HASTA PT (incluyendo a estos " ;F :PRINT
370 INPUT "CUANTOS VALORES SON DESPUES DE EL PUNTO PT (incluyendo a este " ;E :
PRINT
380 GOTO 410
390 INPUT "CUANTOS VALORES SON HASTA EL PUNTO PT (sin contar el punto 0,0 e incl
uyendo a PT " ;A :PRINT
400 INPUT "CUANTOS VALORES SON DESPUES DE EL PUNTO PT (incluyendo a este " ;G :
PRINT
410 K1=A+F+G : DIM X(K1) , Y(K1) , R(K1) , T(K1)
420 CLS : FOR U=1 TO 5 :PRINT :NEXT U
430 INPUT "DAME LA ESCALA DE EL MODELO 1: " ;M : PRINT
440 INPUT "DAME EL GASTO QUE SE MANEJA [prototipo] Q (M3/S) = " ;Q : PRINT
450 INPUT "DAME EL ANCHO DE EL CANAL [prototipo] B ( M ) = " ;B : PRINT
460 GOSUB 1720
470 PRINT "PARA UN H/Hd = " ;W ; " Y X/Hd = 0 ; TENEMOS QUE Y/Hd = " ;Z:PRINT
480 FOR U=1 TO 5000 :NEXT: CLS
490 PRINT "          CALCULO DE (0,0) HASTA PC O PT          ; segunda parte" 30
500 FOR U=1 TO 10 : PRINT : NEXT U
510 PRINT "A CONTINUACION DARAS LAS COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE INTER
ES HASTA EL PUNTO PC O PT (incluyendo PC o PT) "
```

```

520         REM LAS COORDENADAS SON CON REFERENCIA A EL DIBUJO DE EXPLICACION
530         J=1:11=A
540         FOR U=1 TO A
550             PRINT "PUNTO # ";U
560             INPUT "X = "; X(U)
570             INPUT "      Y = "; Y(U)
580         NEXT U
590         GOSUB B80
600         FOR U=1 TO 50000':NEXT:CLS
610         IF S=1 THEN GOTO 620 ELSE GOTO 740
620         PRINT "      CALCULO DE PC HASTA PT      ; tercera parte
           (ya que se tiene una curvatura)"
630         FOR U=1 TO 10 :PRINT :NEXT U
640         PRINT "A CONTINUACION DARAS LAS COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE INTERES DE PC A
PT (incluyendo a estos )"
650         REM LAS COORDENADAS SON CON REFERENCIA A EL DIBUJO DE EXPLICACION
660         J=2:11=F
670         FOR U = 1 TO F
680             PRINT "PUNTO # ";A+U-1:PRINT
690             INPUT "X = "; X(U)
700             INPUT "      Y = "; Y(U)
710         NEXT U
720         GOSUB B80
730         FOR U=1 TO 50000':NEXT:CLS
740         PRINT "      CALCULO A PARTIR DE EL PUNTO PT      ; ultima parte "
750         FOR U= 1 TO 10 :PRINT :NEXT U
760         PRINT "A CONTINUACION DARAS LAS COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE INTERES DE PT E
N ADELANTE (incluyendo a este )"
770         REM LAS COORDENADAS SON CON REFERENCIA A EL DIBUJO DE EXPLICACION
780         J=3:11=G
790         FOR U = 1 TO G
800         IF S=1 THEN PRINT "PUNTO # ";A+F+U-2 ELSE PRINT "PUNTO # ";A+F+U-1
810             INPUT "X = "; X(U)
820             INPUT "      Y = "; Y(U)
830         NEXT U
840         GOSUB B80
850         FOR U=1 TO 50000' :NEXT :CLS
860         END
870         REM Rutina de Programa de Valores X Y R T DO VO D V P
880         CLS : FOR I = 1 TO 10 : PRINT : NEXT I
890         D=(Z*H)*(-1): V=(Q/(D*B))
900         P=H1-(V^2)/(2*9.810001)
910         C=D-P : L=C/H
920         IF AB=1 THEN LPRINT "      ";A7$;"      DESPLOME : ";A6$:LPRINT :LPRINT
NT :LPRINT
930         PRINT "      EN EL PUNTO (0,0) TENEMOS : ";:PRINT:PRINT
940         IF AB=1 THEN LPRINT "      EN EL PUNTO (0,0) TENEMOS : ";:LPRINT:LPRINT
950         PRINT "      UN TIRANTE DE : do = ";D;" m ; [prototipo]: PRINT
960         IF AB=1 THEN LPRINT "      UN TIRANTE DE : do = ";D;" m ; [prototip
o]": LPRINT
970         PRINT "      UN TIRANTE DE : do = ";D/M*100;" cm ; [modelo]": PRINT
980         IF AB=1 THEN LPRINT "      UN TIRANTE DE : do = ";D/M*100;" cm ; [mo
delo]": LPRINT
990         PRINT "      UNA VELOCIDAD DE : Vo = ";V;" m/s ; [prototipo]": PRINT
1000        IF AB=1 THEN LPRINT "      UNA VELOCIDAD DE : Vo = ";V;" m/s ; [prototi
po]": LPRINT
1010        PRINT "      UNA PRESION DE : Po = ";P;" m ; [prototipo]": PRINT
1020        IF AB=1 THEN LPRINT "      UNA PRESION DE : Po = ";P;" m ; [prototi
po]": LPRINT
1030        PRINT "      UNA PRESION DE : Po = ";P/M*100;" cm ; [modelo]": PRINT
1040        IF AB=1 THEN LPRINT "      UNA PRESION DE : Po = ";P/M*100;" cm ; [m
odelo]": LPRINT

```

```

1050 PRINT " UNA DIFERENCIA DE PRESIONES DE : hp = ";C;" m ; {prototipo}
": PRINT
1060 IF AB=1 THEN LPRINT " UNA DIFERENCIA DE PRESIONES DE : hp = ";C;" m
; {prototipo}": LPRINT
1070 PRINT " UNA DIFERENCIA DE PRESIONES DE : hp = ";C/M*100;" cm ; {mod
elo}": PRINT
1080 IF AB=1 THEN LPRINT " UNA DIFERENCIA DE PRESIONES DE : hp = ";C/M*
00;" cm ; {modelo}": LPRINT
1090 PRINT " CON LO CUAL SE DIBUJARA : hp/Hd = ";L;" m ; {prototipo}":
PRINT
1100 IF AB=1 THEN LPRINT " CON LO CUAL SE DIBUJARA : hp/Hd = ";L;" m ;
{prototipo}": LPRINT
1110 PRINT " CON LO CUAL SE DIBUJARA : hp/Hd = ";L/M*100;" cm ; {modelo
}": PRINT
1120 IF AB=1 THEN LPRINT " CON LO CUAL SE DIBUJARA : hp/Hd = ";L/M*100;
cm ; {modelo}": LPRINT
1130 FOR I = 1 TO 5000: NEXT I:
1140 FOR I = 1 TO 2500: NEXT I:CLS
1150 FOR U = 1 TO 11
1160 FOR I = 1 TO 10: PRINT : NEXT I
1170 PRINT " COORDENADAS RECTANGULARES DE EL PUNTO # ";D:PRINT
1180 PRINT " X = ";X(U);" Y = ";Y(U)
1190 FOR I=1 TO 1500:NEXT I
1200 FOR J=1 TO 5: PRINT: NEXT J
1210 T(U) = (ATN((Y(U))/(X(U))))
1220 GOSUB 1860
1230 PRINT " COORDENADAS POLARES DE EL PUNTO # ";D:PRINT
1240 IF S=1 AND J=2 THEN INPUT "VALOR DEL RADIO r(m) = ";R(U): IF S=1 THEN I
NPUT "VALOR DEL ANGULO (grados) = ";T(U):T(U)=T(U)*(3.141592/180)
1250 PRINT " r = ";R(U);" Angulo = ";T(U)*(180/3.141592);" grados"
1260 FOR I=1 TO 2500: NEXT I: FOR J=1 TO 10: PRINT: NEXT J
1270 REM SUBPROGRAMA PARA ENCONTRAR RAICES
1280 PRINT "OBTENIENDO LOS TIRANTES "
1290 A0=(COS(T(U)))
1300 A1=((Y(U)+D+((V*2)/(2*9.810001)))^(1-))
1310 IF J=2 THEN A2=((Q*2)/(E*(B*2)+9.810001*R(U)))
1320 IF J=1 THEN A2=((Q*2)/(E*(B*2)+9.810001*R(U))^(1-))
1330 IF J=3 THEN A2=0
1340 A3=((Q*2)/(E*(B*2)+9.810001))
1350 FOR I = 1 TO 500: NEXT I
1360 INPUT "QUE TIRANTE SE TIENE APROXIMADAMENTE {medido en el modelo} d (c
m) = ";T1: XO=T1*M/100
1370 DEF FNF(B1)=(A0*(B1^3)+(A1*(B1^2)+(A2*B1)+A3
1380 DEF FNF1(B1)=(3*A0*(B1^2)+(2*A1*B1)+A2
1390 B1=XO-(FNF(XO)/FNF1(XO))
1400 D1=ABS(B1-XO)
1410 IF D1<.00001 THEN GOTO 1440
1420 XO=B1
1430 GOTO 1390
1440 X1=B1
1450 FOR I = 1 TO 5: PRINT: NEXT I
1460 PRINT "TIRANTE POSIBLE DE EL PUNTO # ";D: PRINT
1470 PRINT " QUE SE TIENE ES : "
1480 FOR I = 1 TO 5: PRINT: NEXT I
1490 PRINT "d = ";X1;" m ;{prototipo}": PRINT
1500 PRINT "d = ";X1/M*100;" cm ;{modelo}": PRINT
1510 FOR I=1 TO 5000: NEXT I
1520 E=X1
1530 CLS:FOR I=1 TO 10:PRINT: NEXT I
1540 PRINT "LAS PRESIONES QUE SE TIENEN PARA EL PUNTO # ";D: PRINT
1550 IF J=1 THEN P1=((E*COS(T(U)))-((Q*2)/(E*(B*2)+9.810001*R(U))))
1560 IF J=2 THEN P1=((E*COS(T(U)))+((Q*2)/(E*(B*2)+9.810001*R(U))))
1570 IF J=3 THEN P1=((E*COS(T(U))))

```

```

1580 PRINT "LA PRESION QUE SE TIENE ES : P = ";P1;" m ; {prototipo}" ; PRINT
T
1590 PRINT "LA PRESION QUE SE TIENE ES : P = ";P1/M*100;" cm ; {modelo}" ;
PRINT
1600 Q1=E-P1
1610 PRINT "LA DIFERENCIA DE PRESIONES ES DE : hp = ";Q1;" m ; {prototipo}"
; PRINT
1620 PRINT "LA DIFERENCIA DE PRESIONES ES DE : hp = ";Q1/M*100;" cm ; {mode
lo}" ; PRINT
1630 L1=Q1/H
1640 PRINT "CON LO CUAL SE DIBUJARA hp/Hd = ";L1;" m ; {prototipo}"; PRINT
1650 PRINT "CON LO CUAL SE DIBUJARA hp/Hd = ";L1/M*100;" cm ; {modelo}"; P
RINT
1660 IF AB=1 THEN LPRINT " # h P hp
hp/Hd"
1670 IF AB=1 THEN LPRINT " (cm) (cm) (cm)
(cm)";LPRINT :LPRINT:AB=0
1680 LPRINT " ";Q1;" ";E/M*100;" ";P1/M*100;" ";Q1/M*100;" ";
L1/M*100
1690 FOR I=1 TO 5000 : NEXT I:O=O+1
1700 NEXT U
1710 RETURN
1720 REM SUBROUTINA PARA CALCULAR Y/Hd
1730 IF W<.5 OR W=.5 THEN U1=0 ELSE U1=.5
1740 IF W<.5 OR W=.5 THEN V1=.5 ELSE V1=1
1750 IF W<.5 OR W=.5 THEN Y1=0 ELSE Y1=-.384
1760 IF W<.5 OR W=.5 THEN Z1=-.384 ELSE Z1=-.805
1770 IF V1>U1 THEN F1=V1-U1
1780 IF V1<U1 THEN F1=U1-V1
1790 IF Z1>Y1 THEN G1=Z1-Y1
1800 IF Z1<Y1 THEN G1=Y1-Z1
1810 IF W>U1 THEN W1=W-U1
1820 IF W<U1 THEN W1=U1-W
1830 R1=(W1*G1)/F1
1840 IF Y1>Z1 THEN Z=Y1-R1 ELSE Z=Y1+R1
1850 RETURN
1860 REM SUBROUTINA PARA OBTENER R
1870 E1=1/M1
1880 P1=3.141592654#; CO=90*P1/180
1890 C1=CO-T(U) ; HO=H*M1
1900 D1=(1/(K*HO))
1910 DO=(SIN(C1)) ; D2=(COS(C1)) ; D3=D2*N ; D4=D1*D3
1920 R(U)=(DO)/(D4)*E1
1930 FOR I=1 TO 10 :PRINT :NEXT I
1940 FOR I=1 TO 150 : NEXT I
1950 RETURN

```

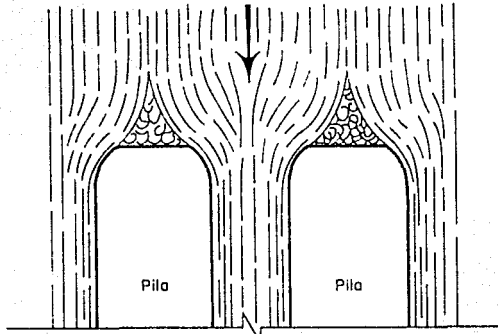


FIG 14a (ref 6)

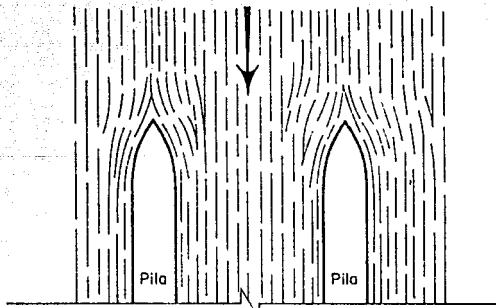
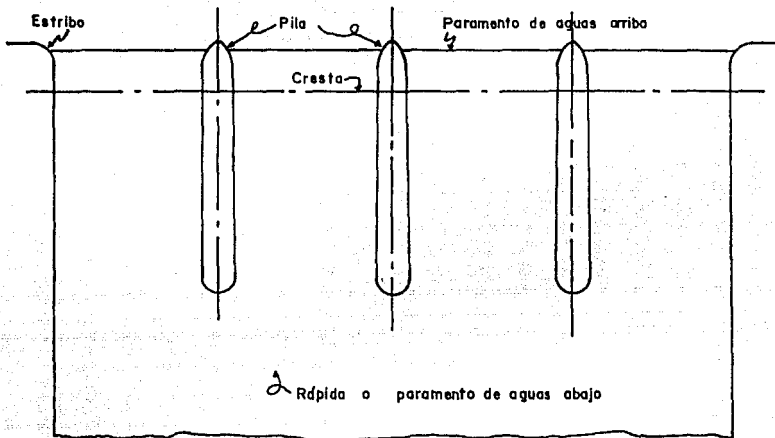
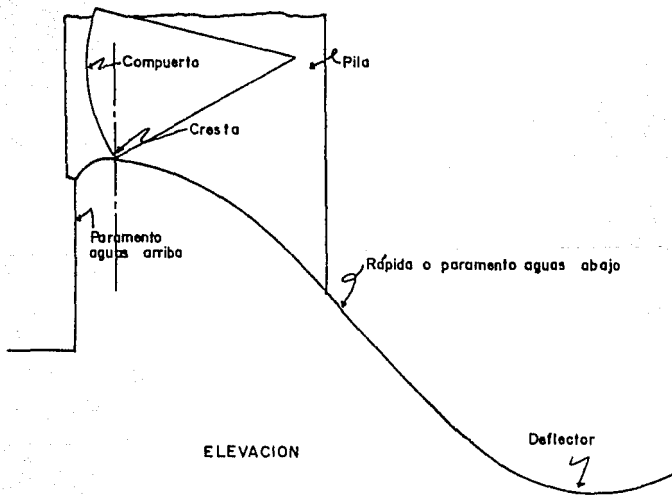


FIG 14b (ref 6)



PLANTA



ELEVACION

FIG 15 Elementos de una obra de excedencias

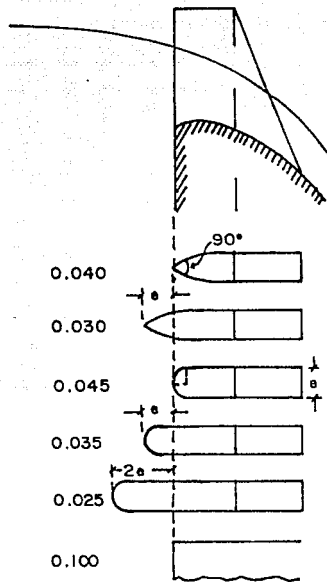


FIG 16 Coeficientes de contracción, Creager y Justin (ref 6)

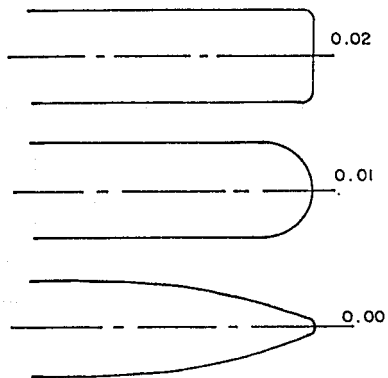
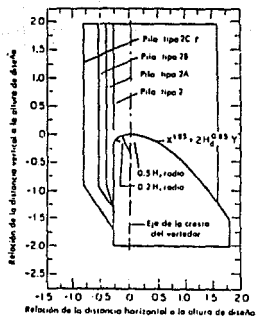
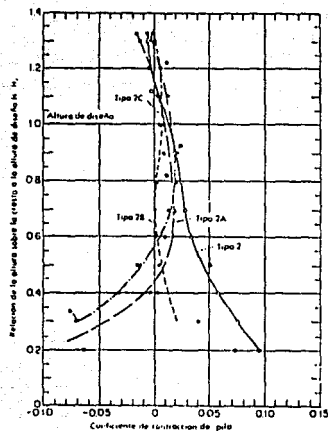
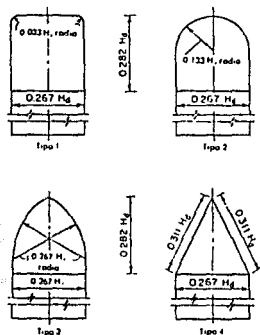
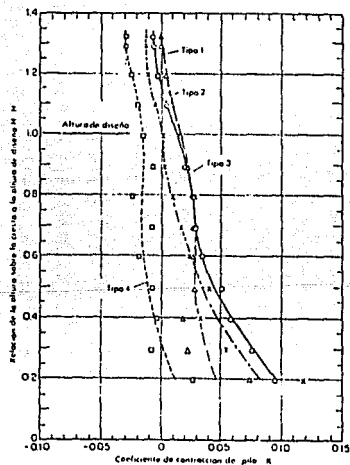


FIG 17 Coeficientes de contracción Torres H. (ref 7)



CRESTAS ALTAS DE DEBORDO CON COMPLETOS COEFICIENTES DE CONTRACCION DE PILAS  
EFECTO DE LA LONGITUD DE PILA

FIG 18 Coeficiente de contracción para pila de nariz redonda en presas altas (ref2)



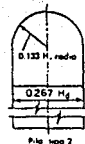
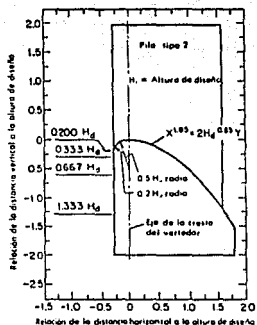
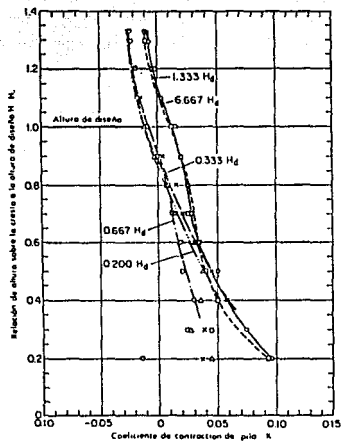
FORMAS DE NARIZ DE PILA

Nariz de pila ubicada en el mismo lugar como la cresta arriba del vertedor.

CRESTAS ALTAS DE DEBORDO CON COMPLETOS COEFICIENTES DE CONTRACCION DE PILA  
EFECTO DE LA FORMA DE LA NARIZ

FIG 19 Coeficientes de contracción para pilas de varias formas de nariz en presas altas (ref2)





CRESTAS OGER BAJAS CON CUPIERTAS COEFICIENTES DE CONTRACCIÓN DE PILA EFECTO DE LA PROFUNDIDAD DE LIGADA

FIG 20 Coeficiente de contracción para pila de nariz redonda en presas bajas (ref 2)

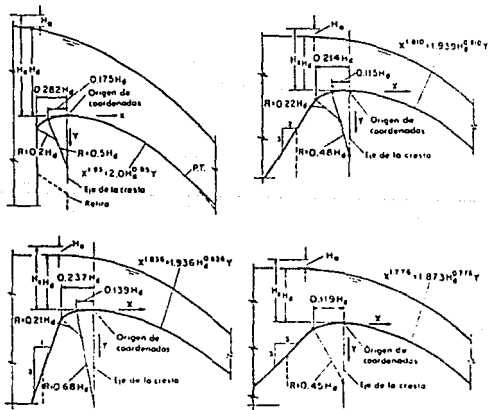
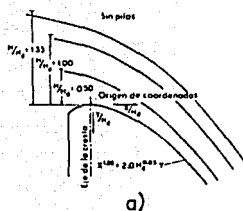


FIG 22 Las formas WES-standard de vertedores (ref 2)



Coordenadas de la zona superior en pilas \*

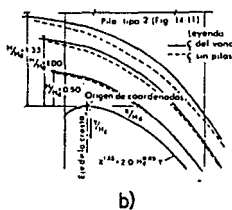
$H/H_0 = 0.50$		$H/H_0 = 1.00$		$H/H_0 = 1.33$	
$X/H_0$	$Y/H_0$	$X/H_0$	$Y/H_0$	$X/H_0$	$Y/H_0$
-1.0	-0.495	-1.0	-0.833	-1.0	-1.210
-0.8	-0.484	-0.8	-0.915	-0.8	-1.185
-0.6	-0.475	-0.6	-0.993	-0.6	-1.151
-0.4	-0.460	-0.4	-0.965	-0.4	-1.110
-0.2	-0.425	-0.2	-0.821	-0.2	-1.060
0.0	-0.371	0.0	-0.755	0.0	-1.000
0.2	-0.300	0.2	-0.681	0.2	-0.919
0.4	-0.250	0.4	-0.586	0.4	-0.821
0.6	-0.075	0.6	-0.455	0.6	-0.705
0.8	0.075	0.8	-0.320	0.8	-0.564
1.0	0.208	1.0	-0.145	1.0	-0.411
1.2	0.470	1.2	0.055	1.2	-0.220
1.4	0.705	1.4	0.296	1.4	-0.002
1.6	0.872	1.6	0.563	1.6	0.243
1.8	1.269	1.8	0.857	1.8	0.631

\* Basado sobre ensayos (W 80) para velocidad despreciable de llegada

Coordenadas para la zona superior en la zona central del vano sin pilas \*\*

$H/H_0 = 0.50$		$H/H_0 = 1.00$		$H/H_0 = 1.33$	
$X/H_0$	$Y/H_0$	$X/H_0$	$Y/H_0$	$X/H_0$	$Y/H_0$
-1.0	-0.492	-1.0	-0.941	-1.0	-1.250
-0.8	-0.486	-0.8	-0.922	-0.8	-1.215
-0.6	-0.472	-0.6	-0.913	-0.6	-1.194
-0.4	-0.457	-0.4	-0.900	-0.4	-1.163
-0.2	-0.431	-0.2	-0.856	-0.2	-1.122
0.0	-0.384	0.0	-0.803	0.0	-1.071
0.2	-0.312	0.2	-0.725	0.2	-1.013
0.4	-0.220	0.4	-0.641	0.4	-0.944
0.6	-0.086	0.6	-0.539	0.6	-0.847
0.8	0.075	0.8	-0.389	0.8	-0.723
1.0	0.237	1.0	-0.202	1.0	-0.564
1.2	0.462	1.2	0.015	1.2	-0.326
1.4	0.705	1.4	0.264	1.4	-0.102
1.6	0.871	1.6	0.521	1.6	0.172
1.8	1.278	1.8	0.840	1.8	0.450

\*\* Basado sobre ensayos (W 80) para velocidad despreciable de llegada



Coordenadas para la zona superior a la zona de las pilas \*

$H/H_0 = 0.50$		$H/H_0 = 1.00$		$H/H_0 = 1.33$	
$X/H_0$	$Y/H_0$	$X/H_0$	$Y/H_0$	$X/H_0$	$Y/H_0$
-1.0	-0.495	-1.0	-0.950	-1.0	-1.253
-0.8	-0.492	-0.8	-0.945	-0.8	-1.221
-0.6	-0.490	-0.6	-0.929	-0.6	-1.209
-0.4	-0.482	-0.4	-0.933	-0.4	-1.218
-0.2	-0.440	-0.2	-0.925	-0.2	-1.244
0.0	-0.383	0.0	-0.778	0.0	-1.103
0.2	-0.265	0.2	-0.651	0.2	-0.950
0.4	-0.183	0.4	-0.545	0.4	-0.821
0.6	-0.076	0.6	-0.428	0.6	-0.688
0.8	0.060	0.8	-0.265	0.8	-0.549
1.0	0.240	1.0	-0.121	1.0	-0.399
1.2	0.445	1.2	0.063	1.2	-0.215
1.4	0.673	1.4	0.286	1.4	0.011
1.6	0.925	1.6	0.521	1.6	0.208
1.8	1.277	1.8	0.779	1.8	0.432

\* Basado sobre ensayos (W 80) para velocidad despreciable de llegada

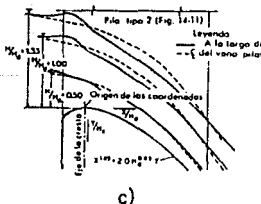


FIG2I Perfiles de la lámina superior del flujo sobre vertedores WES con y sin pilas (ref 2)

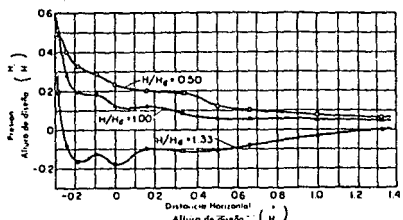


FIG 23 Presiones en la cresta sobre vertedores altos WES de desborde a) Sin pilas (ref2)

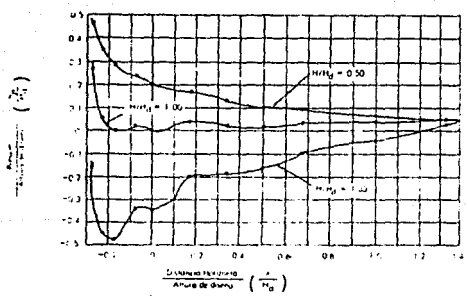
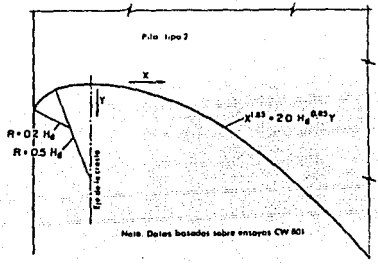
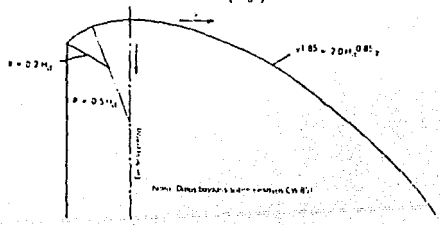


FIG 24 Presiones en la cresta sobre vertedores altos WES de desborde b) A lo largo de la línea central del vano de la pila (ref2)



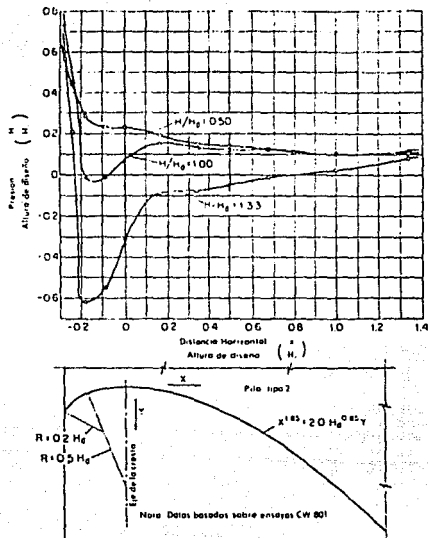


FIG25 Presiones sobre la cresta en vertedores altos WES de desborde c) A lo largo de las pilas (ref 2)

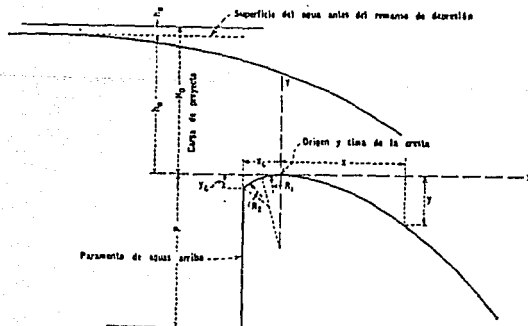


FIG26(ref4)

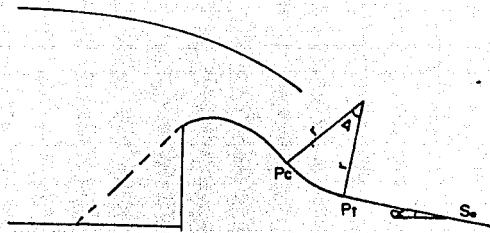


FIG 27

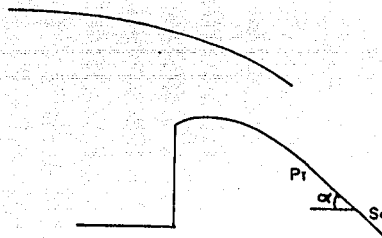


FIG 28

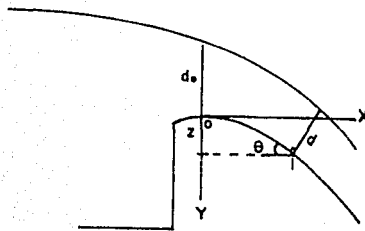


FIG 29

#### 4. MEDICIONES

En éste capítulo se expondrán los resultados que se obtuvieron de las mediciones que se realizaron en tres modelos físicos, ellos se refieren, principalmente, a la obtención de los valores del coeficiente de contracción "Kp" y de las presiones que se llegan a generar sobre el cimacio. A continuación se hará una descripción de cada uno de los modelos utilizados.

El modelo 1, que representa a un vertedor en túnel cuenta con un canal de llamada, un cimacio y una rápida con un ángulo de inclinación de 25° y la sección transversal tipo portal.

##### Datos de proyecto

Ecuación del cimacio	$X^{1.85} = 2 H_d^{0.65} Y$
Elevación del NAME	288.43 m
Elevación del NAMO	270.00 m
Elevación de la cresta vertedora	259.00 m
Gasto de diseño por la obra de excedencias	6,000.00 m <sup>3</sup> /s
Número de pilas	1
Longitud vertedora total	26.00 m
Carga de diseño del cimacio	22.0m
Perfil del cimacio	Ver fig 30
Escala del modelo	1:100
Paramento aguas arriba	Vertical
Cuenta con 18 piezómetros, 9 en cada vano, colocados en el centro.	

En el modelo 1 los experimentos que se llevaron a cabo, fueron cambiando el perfil de la pila pasando de vertical a inclinada o desplomada, se ensayaron varias de ellas, y la geometría de la nariz cambió de un tipo 2 recomendado por WES, para el caso vertical, a otra de tipo 3 para la segunda. El valor del desplome de las pilas se decidió conforme se observa el funcionamiento hidráulico de ellas; es decir se realizó el experimento y al tener los resultados se decidió el siguiente valor de desplome que se necesita, ver figs 31 y 32.

Primero se realizó un experimento con una pila vertical y posteriormente se desplomaron 6:1, 4:1 y 7:1, respectivamente, en todos los casos ellos empezaban en el inicio del paramento aguas arriba del cimacio, luego se repitió lo mismo con los desplomes 6:1 y 4:1, pero éstos no arrancaron desde el paramento aguas arriba, sino se adelantaron 3.5 m aguas arriba del paramento, ver fig 33.

El modelo 2 tiene un canal de llamada, el paramento aguas arriba tiene un talud de 1:1 y de ahí se continua con un cimacio, después se tiene una curva con  $r=60m$  y un  $\Delta=21^{\circ}17'22''$  y continua una rápida con una pendiente de  $S=0.10$ . En este caso el modelo usado fue un vertedor a cielo abierto y sección transversal rectangular.

Datos de proyecto

Ecuación del cimacio	$X^{1.7475} = 1.878 H_d^{0.7475}$ Y
Elevación del NAME	232.00 m
Elevación del NAMO	220.00 m
Elevación de la cresta vertedora	210.00 m
Gasto de diseño por la obra de excedencias	15,000.00 m <sup>3</sup> /s
Número de pilas (se utilizó solo un canal)	2
Longitud vertedora total	35.70 m
Carga de diseño del cimacio	22.00 m
Perfil del cimacio	Ver fig 34
Escala del modelo	1:70
Paramento aguas arriba	Inclinado 1:1
Conta con 6 piezómetros en cada uno de sus tres vanos, colocados al centro.	

El modelo 2 mantiene un desplome de 6.7:1 y una nariz hidrodinámica, el desplome en este caso comienza 2.26 m aguas arriba del paramento, ver fig 35. Aquí los cambios que se hicieron fueron con las colas de las pilas, siendo cuatro diferentes terminaciones las que se colocaron para cada uno de los experimentos, ver figs 35a a 35d.

El modelo 3 corresponde a un vertedor en túnel, que tiene un pequeño canal de llamada, está formado por un cimacio tipo Creager y una rápida con un ángulo de inclinación de 15°. La sección transversal es del tipo portal.

Datos de proyecto	
Ecuación del cimacio	$X^{1.85} = 2 H d^{0.85} Y$
Elevación del NAME	1563.00 m
Elevación del NAMO	1560.00 m
Elevación de la Cresta Vertedora	1548.85 m
Gasto de Diseño por la obra de excedencias	2460.00 m <sup>3</sup> /s
Número de Pilas	2
Longitud Vertedora total	23.70 m
Carga de Diseño del Cimacio	14.15 m
Perfil del Cimacio	Ver fig 36
Escala del Modelo	1:74.31
Paramento aguas arriba	Vertical
Cuenta con 5 piezómetros en cada vano, siendo un total 15, localizados al centro del vano.	

El modelo 3 tiene sus dos pilas con un desplome 6:1 y una nariz hidrodinámica semejante a las de los dos modelos anteriores, el desplome de las pilas empieza a 4.65 m antes del paramento aguas arriba. En este modelo no se realizaron ningún tipo de cambios en la geometría de las pilas, ver fig 37.



#### 4.1 Obtención del "Kp" Experimental

Para poder llegar a obtener los coeficientes de contracción "Kp" que llegasen a presentarse con los diferentes gastos que se manejan en los tres modelos físicos; primeramente se procede a realizar la medición de la longitud efectiva de la cresta "Le" que se llega a presentar en cada uno de los vanos que se tengan en el cimacio del vertedor, provocado por el efecto de la pila.

Obtenida la longitud efectiva "Le" se procede a obtener los valores del coeficiente de contracción "Kp", con la ec 11.

$$Kp = \frac{L - Le}{2 N H} \quad (11)$$

Obtenidos los coeficientes de contracción "Kp", con la ec 11 se procedió a relacionar el valor del coeficiente contra la relación H/Hd.

En las figs 38 y 39 se pueden observar los valores de Kp para diferentes desplomes [sin desplome, 4:1, 6:1,7:1] que se llevaron a cabo en el modelo 1. En la fig 40 se muestran los resultados obtenidos en el modelo 1 con las pilas desplomadas 4:1 y 6:1 y con un saliente de 3.5 m a partir del paramento de aguas arriba.

En la fig 41 se presentan los diferentes valores de Kp que se obtuvieron de las mediciones en el modelo 2, contándose con diferentes tipos de terminación aguas abajo de la pila.

Los valores de Kp para el modelo 3, con una pila desplomada 6:1, se presentan en la fig 42.

## 4.2 Obtención de Presiones

Los resultados que surgieron de las mediciones realizadas con respecto a las presiones en los tres modelos experimentales, fueron por medio de piezómetros que se encuentran conectados en el cimacio y parte de la rápida del vertedor. Cada uno de los modelos tiene instalado un tablero donde se realizan las mediciones correspondientes.

En el modelo 1 para diferentes desplomes (4:1, 6:1, 7:1 y sin desplome), se observó que a relaciones de alturas pequeñas la presión tiene un comportamiento muy irregular, se encuentra subiendo y bajando en cualquiera de los puntos marcados por los piezómetros correspondientes, sin poder llegar a mantenerse constante con algún desplome.

Conforme se va aumentando la carga de agua se va estabilizando la presión en esos puntos para todos los desplomes, llegando así a formar una sola línea el conjunto de todas las presiones con respecto a su carga y desplome. Cuando llega a presentarse esto, se puede localizar que en la cresta del vertedor se tiene una presión considerable; y conforme va recorriendo los demás puntos del cimacio ésta va bajando considerablemente, hasta llegar a un punto en que tiende a recuperarse inmediatamente para cuando entra a la rápida la presión no es muy baja e irse elevando poco a poco durante su trayectoria hasta establecerse igual a la hidrostática; para la localización de los piezómetros ver fig 43.

Con respecto a las pilas desplomadas 4:1 y 6:1 con un saliente de 3.5 m, las presiones que se llegan a presentar son muy semejantes a las que se presentaron con las pilas anteriores. En la cresta del vertedor, es donde se registra una presión positiva y de ahí comienza a decaer, hasta que llega a un punto donde empieza a recuperarse inmediatamente, tendiendo a mantenerse cerca del tirante a lo largo de la rápida del modelo 1; para la localización de los piezómetros ver fig 43.

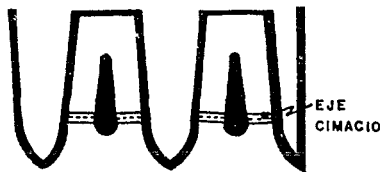
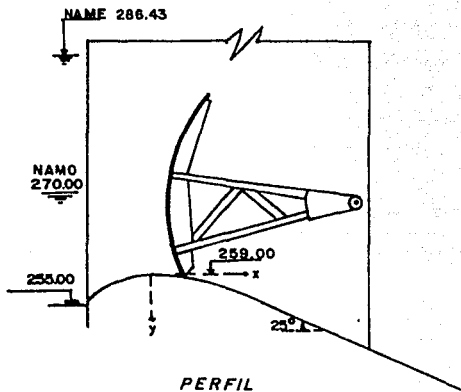
En el modelo 2 se realizaron los experimentos con una pila desplomada 6.7:1 y se colocaron cuatro diferentes terminaciones aguas abajo de la pila. Se empezaron a medir las presiones desde el inicio del paramento de aguas arriba, siendo ahí donde se encuentran localizados los primeros piezómetros. Se puede observar que en este punto la presión se encuentra por arriba del tirante de agua, y de ahí empieza a decaer rápidamente hasta la cresta del vertedor; aquí es donde se presenta la presión más baja sin que llegue a presentarse una presión negativa, esto último es mas notorio conforme aumenta la carga de agua. Después que pasa el punto (0,0) comienza a recuperarse la presión entre este punto y el  $P_c$ , ver fig 27, en donde va subiendo hasta llegar a pasar el tirante de agua para que posteriormente vaya descendiendo (presentándose este efecto en la forma convexa entre  $P_c$  y  $PT$ ) y al encontrarse con la rápida tiende a normalizarse la presión e ir por debajo y paralelamente del tirante de agua, para la localización de los piezómetros ver fig 44.

El modelo 3 cuenta con una pila desplomada 6:1 y las mediciones de la presión se empezaron a tomar antes de la cresta del vertedor. En ese lugar la presión que se tiene es positiva, pero sin llegar a pasar el tirante de agua, de ahí comienza a decaer hasta el punto (0,0) del cimacio, y al llegar a este punto tiende a recuperarse la presión y va aumentando hasta llegar a la rápida y es aquí donde empieza a mantenerse constante, para la localización de los piezómetros ver fig 45.

Como se puede ver en ningún modelo se reportan presiones negativas; sin embargo en los modelos 2 y 3 si llega a preocupar ésta, ya que para cargas grandes en la cresta del vertedor llega a bajar demasiado y es ahí donde se tiene la presión más baja. Sin embargo en el modelo 1 puede asegurarse que en ningún momento se llegará a presentar alguna presión negativa.

Los resultados se han presentado en las figs 46 a 50, y para ello se han relacionado  $hp/Hd$  y  $X/Hd$ , en donde  $hp$  es la carga de presión medida y  $X$  la distancia, con origen en la cresta del vertedor, con la cual se localiza el punto de medición.

# MODELO 7

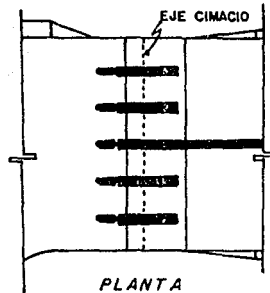
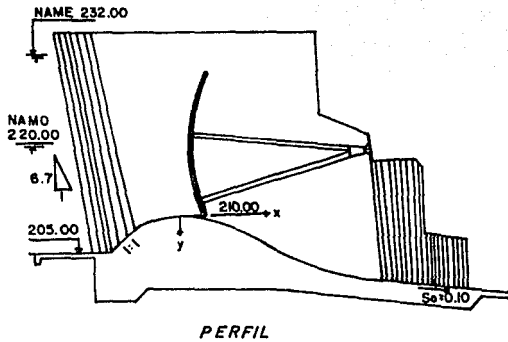


PLANTA

ESTRUCTURA DE CONTROL

FIG 30

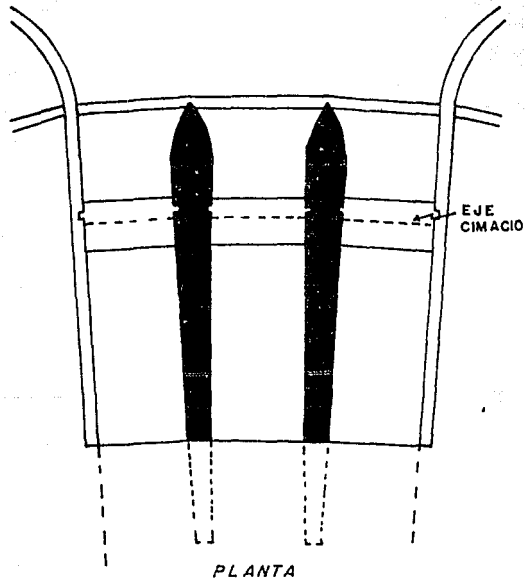
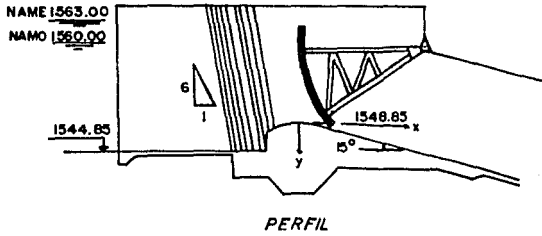
# MODELO 2



ESTRUCTURA DE CONTROL

FIG 34

# MODELO 3



ESTRUCTURA DE CONTROL

FIG 36

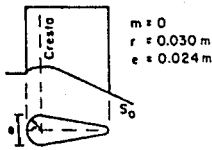


FIG 31

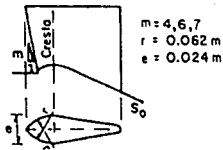


FIG 32

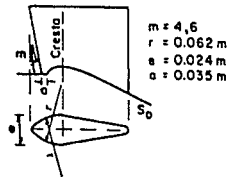


FIG 33

MODELO 1

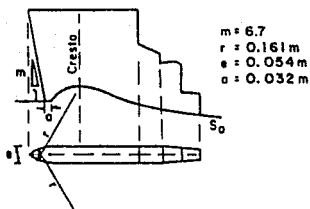


FIG 35



FIG 35a



FIG 35b



FIG 35c



FIG 35 d

Terminación de pila

MODELO 2

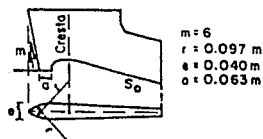


FIG 37

MODELO 3

GEOMETRIA DE PILAS

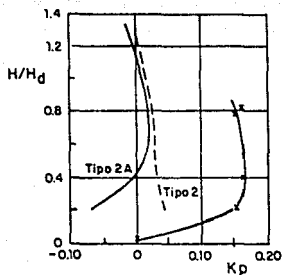


FIG 38 Modelo 1 (fig 31)

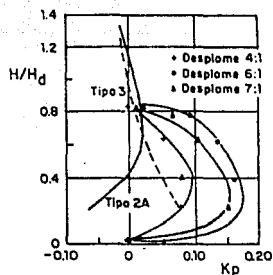


FIG 39 Modelo 1 (fig 32)

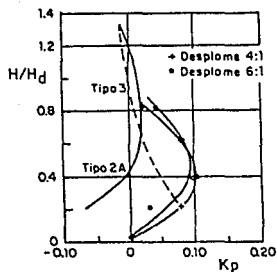


FIG 40 Modelo 1 (fig 33)

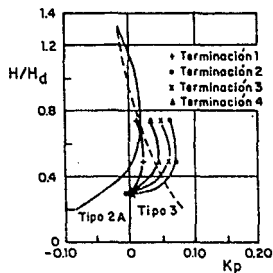


FIG 41 Modelo 2 (fig 35)

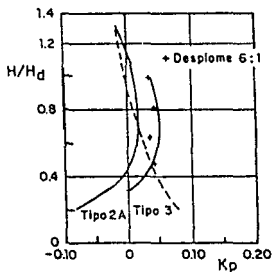


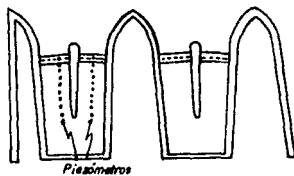
FIG 42 Modelo 3 (fig 37)

VALOR DE  $K_p$



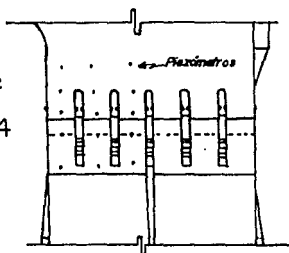
MODELO 1

FIG 43



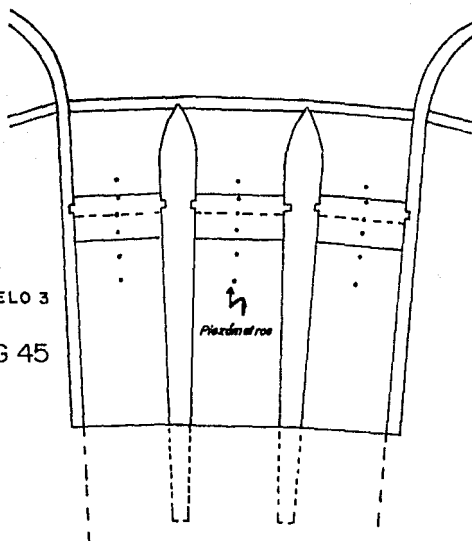
MODELO 2

FIG 44



MODELO 3

FIG 45



LOCALIZACION DE PIEZOMETROS

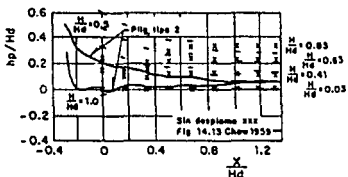


FIG 46 Modelo1 (fig31)

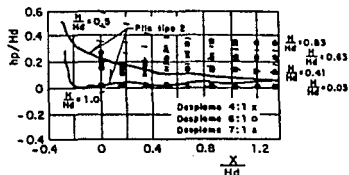


FIG 47 Modelo1 (fig32)

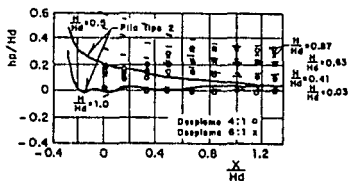


FIG 48 Modelo1 (fig33)

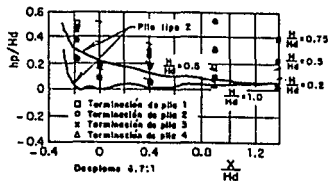


FIG 49 Modelo2 (fig35)

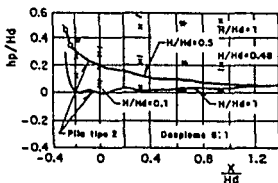


FIG 50 Modelo3 (fig37)

DISTRIBUCION DE PRESIONES AL CENTRO DEL VANO

## 5. ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizarán los resultados que se obtuvieron de las mediciones realizadas en los tres modelos físicos mencionados en el cap 4 los datos principales a comparar son el coeficiente de contracción y la distribución de presiones ejercida sobre el cimacio.

### 5.1 Análisis de Resultados del "Kp"

Los valores se presentan en las figs 38 a 42, en las cuales se han añadido los obtenidos de una serie de experimentos realizados por WES (fig. 14.11, ref 2). Del análisis de dichas figuras se concluye que en los datos de los tres modelos y los del WES hay una diferencia considerable de los valores de "Kp".

Para el modelo 1 se puede ver que los valores obtenidos de "Kp", con los diferentes desplomes (sin desplome, 4:1, 6:1 y 7:1), por medio de la ec 11, al compararse entre sí los resultados de cada uno de los desplomes presentan un comportamiento totalmente diferente, ya que en ninguno de los casos se llega a presentar una tendencia de "Kp" que se encuentre en un cierto rango, ya que para cada desplome se tienen diferencias de valores para las diferentes relaciones de cargas que se manejan, ver figs 38 y 39.

Para las pilas sin desplome los valores de "Kp", llegan a ser grandes, sin embargo se puede decir que la que presenta un funcionamiento hidráulico aceptable es la pila con desplome 4:1, ver fig. 39.

En el modelo 1 con pilas desplomadas 4:1 y 6:1 con un saliente de 3.5 m, al comparar los resultados de los valores de "Kp", obtenidos con la ec 11, entre los dos desplomes, sí presentan una cierta tendencia, pero con un rango muy amplio, ver fig 40; al adelantar el desplome aguas arriba del paramento, experimentalmente se observa que ayuda provocando que la entrada del flujo sea estable y se disminuyan las ondas cruzadas.

Para el modelo 2, como se mencionó anteriormente, se mantuvo el desplome 6.7:1 y los cambios se realizaron en la cola de la pila, con cuatro diferentes terminaciones. Los resultados de "Kp", que se obtuvieron con la ec 11, para diferentes gastos, se encuentran muy dispersos cuando se comparan entre sí los valores de cada uno de los cambios; sin embargo se llega a observar que ellas siguen el mismo comportamiento, ver fig 41.

El modelo 3 mantiene constante la geometría de las pilas. Los resultados que se obtuvieron al aplicar la ec 11 con diferentes cargas de agua, vuelven a confirmar lo que se obtuvo en los otros modelos. Los valores de "Kp" que se presentan cuando se tienen cargas pequeñas son iguales a cero, mientras que para las cargas medianas y grandes oscilan en un rango pequeño, ver fig 42.

Como se dijo anteriormente en las figs 38 a 42 se presentan los valores medidos de "Kp" en los tres modelos y en esas mismas figuras se han puesto lo que propone el WES. Del análisis de ellos se puede concluir que a excepción de la fig 42 el resto no presenta concordancia con los medidos por el WES.

Las diferencias entre los valores medidos y los del WES estriban en el hecho de que los modelos 1 y 2 llevan canal de llamada, en cambio el modelo 3 solo tiene un pequeño canal de acceso por ello que la comparación que se observa en la fig 42 (modelo 3) muestre buena semejanza con las curvas del WES ya que ellas fueron hechas para la condición mostrada en la fig 51. Sin embargo, las curvas obtenidas en los modelos 1, 2 y 3 son parecidas en su forma a la pila del tipo 2A mostrada en la fig 51, ello se puede observar en las figs 38 a 42.

## 5.2 Análisis de Resultados de las Presiones

En el modelo 1 las presiones que se generaron en el vertedor para los diferentes desplomes (sin desplome, 4:1, 6:1, 7:1), se tiene que para gastos pequeños los resultados con la ec 29 presentan valores negativos en la cresta del cimacio, pasando a ser positivos sin que se llegue a establecer esto. No siendo esto para gastos grandes, aquí las presiones en el punto (0,0) son altas, comenzando a bajar a partir de ese punto a todo lo largo del cimacio, para que al llegar a la rápida se mantengan casi igual a la hidrostática.

Las mediciones reflejan resultados diferentes a los anteriores, en éstos no hay presiones negativas sobre la cresta del vertedor, ni ellas llegan a presentar cuando se tienen gastos pequeños. Para los gastos grandes no se presentan presiones tan elevadas como las teóricas sobre el punto (0,0) pero sí son representativas; a partir de éste punto la presión comienza a bajar en un pequeño tramo sobre el cimacio para posteriormente irse elevando, aún durante la sección de la rápida.

Como se puede ver para gastos pequeños con la ec 29 se llegan a presentar presiones negativas; sin embargo experimentalmente se comprobó lo contrario, ya que en ninguno de los desplomes se obtuvieron valores negativos. En el caso de tener gastos grandes, la ec 29 indica que la presión empieza a descender paulatinamente hasta establecerse y manteniéndose casi constante, pero según las mediciones realizadas en el modelo físico, se obtuvo que si baja la presión, pero después se recupera bruscamente para seguir subiendo constantemente, ver figs 46 y 47.

Para el modelo 1 con los desplomes 4:1 Y 6:1 que con un saliente de 3.5 m, los resultados que se obtuvieron con la ec 29 cambian un poco con respecto al caso anterior del mismo modelo, la presión baja durante un corto tramo del cimacio estableciéndose posteriormente y volverse casi constante, para volver a bajar y después se mantiene estable. Sin embargo para los gastos pequeños se presentaron de nuevo presiones negativas sobre la cresta del vertedor. Experimentalmente los valores que se presentaron de las mediciones realizadas en este modelo, se tiene que el compartimiento de las presiones que se obtuvieron son semejantes a los resultados que se tienen en el caso anterior del mismo modelo 1. No se presentaron presiones negativas. Lo que si es notorio, es que con el cambio de geometría que se le realizó a la pila, para gastos pequeños, la presión se mantiene estable a todo lo largo del vertedor, ver fig 48.

Para el modelo 2 los resultados que se obtuvieron con la ec 29 indican que las presiones que se generan sobre la cresta del vertedor son muy altas, las cuales bajan bruscamente a lo largo del cimacio hasta la mitad de la curvatura que se tiene en larápida, y a partir de este punto comienza a aumentar la presión, fig 49. Experimentalmente se midió que las presiones sobre el cimacio son menores que las que se tienen de la ec 29, a partir de ahí comienza a aumentar y cuando se encuentran entre los puntos Pc y PT va aumentando el valor de éstas hasta la mitad de la curvatura, en donde empiezan a descender los valores de las presiones; se puede decir que en esta zona la presión se presenta para una curvatura del tipo convexo.

Con los resultados obtenidos del modelo 2, se tiene que las presiones que se generan sobre el cimacio son todas positivas, unas más elevadas que otras. Pero cuando se encuentra entre los puntos  $P_c$  y  $P_T$ , ver fig 49 según la ec 29 la presión baja hasta el punto intermedio para después empezar a subir; pero experimentalmente se muestra que al pasar el flujo de agua sobre la curvatura el tirante de agua disminuye hasta la mitad de esta sección por eso la presión aumenta bruscamente, al pasar este punto el tirante de agua se vuelve a recuperar y por esto la presión vuelve a disminuir; ello es provocado por la curvatura convexa.

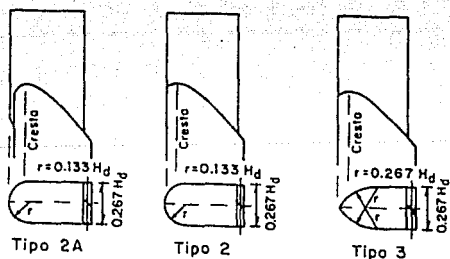
Para el modelo 3 los resultados que se obtuvieron al aplicar con la ec 29 indican que la presión se mantiene alta sobre la cresta del cimacio y comienza a bajar a lo largo del perfil de éste y de la rápida, sin llegar a presentar alguna modificación. Las mediciones realizadas en este modelo señalan que en la cresta del vertedor es donde se tiene la presión más baja, y a partir de este punto empieza a subir a todo lo largo del cimacio y de la rápida, ver fig 50.

En las figs 46 a 50 se muestra la distribución de presiones medidas en los modelos 1, 2 y 3 y también se ha añadido las obtenidas por el WES.

Del análisis de estas figuras se concluye que presentan un comportamiento diferente a los representadas por el WES, pero hay que indicar que estas últimas fueron obtenidas para la condición de la pila tipo 2 (ver fig 51). Hay que destacar el hecho de que no se presentan caídas muy fuertes de presión y no se llega a tener valores negativos En este caso si puede decirse que la presencia del canal de llamada, la forma de la nariz y el perfil de la pila juegan un papel muy importante.

### 5.3 Costos

En las figs 52 a 55 se presenta la relación entre los gastos medidos en los modelos 1, 2 y 3 y los calculados teóricamente, en general puede decirse que los valores son iguales, aunque en algunos casos el experimental da mayor que el teórico o viceversa. Sólo en el caso de la fig 55 el teórico resulta ligeramente mayor que el experimental.



Pilas tipo WES (ref 2)

FIG 51



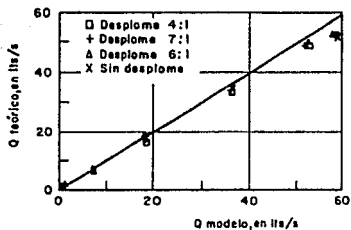


FIG52 Modelo1 (figs 31 y 32)

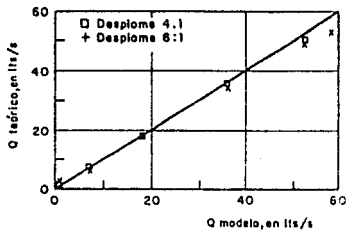


FIG 53 Modelo1 (fig 33)

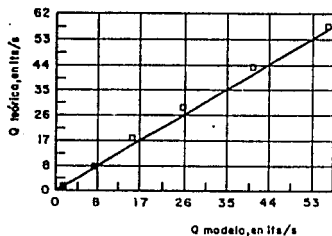


FIG 54 Modelo 2 (fig 35)

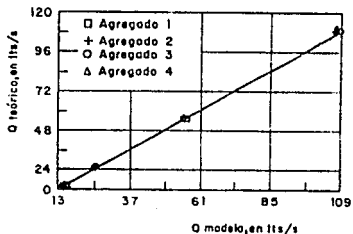


FIG55 Modelo 3 (fig 36)

## COMPARACION DE GASTOS MEDIDOS Y CALCULADOS

## 6. CONCLUSIONES

En los capítulos anteriores se ha descrito el diseño de las pilas sobre vertedores de excedencias, en donde se expuso una serie de autores que desarrollaron o crearon algún tipo de pila. Con lo cuál se llega a la conclusión de que el poder llegar a desarrollar una pila lo más hidrodinámica posible, ayudaría a disminuir los problemas que se presentan en una obra de excedencias; ya que ésta es una estructura importante para la seguridad de una presa.

En base a los resultados obtenidos sobre el desplome de pilas, se tiene que en la mayoría de los casos, si no es que en todos, los resultados que se obtuvieron ya sea por una ecuación o un programa, algunos difieren de los que se lograron obtener por medio de las mediciones realizadas en los tres modelos físicos.

En lo que respecta al coeficiente de contracción " $K_p$ ", éste no se ve que llegue a presentar un mejoramiento en sus valores, como se puede observar en las figs 38 a 42. Con esto no se logra modificar el que se desaloje más gasto que el que se tienen proyectado, debido a que el " $K_p$ " no disminuye. Por lo tanto el que se modifique la geometría de la pila no ayuda a que el coeficiente de contracción pueda ser menor.

Haciendo ahora referencia a la distribución de presiones, se tiene que por medio de la ec 29 se puede llegar a presentar valores negativos, sobre todo en la cresta del vertedor y con esto provocar algún problema en la estructura de control; sin embargo experimentalmente en ninguno de los tres modelos se llegó a presentar algún caso con valores negativos. Por lo tanto se puede concluir que el desplomar la pila garantiza el que no se presenten presiones negativas, y si el desplome comienza adelante del paramento aguas arriba provoca que la presión se mantenga uniforme sobre el cimacio, esto ocurre, principalmente con gastos pequeños.

En conclusión se llega a que aparentemente el usar pilas con desplome implica tener valores más grandes de "Kp" que los propuestos para pilas verticales pero hay que investigar más la influencia del canal de acceso sobre dicho coeficiente. Por otra parte se tienen presiones mayores que garantizan que no se van a presentar presiones negativas, lo cual puede ser más atractivo desde el punto de vista de estabilidad del cimacio pero a la vez resultará más costoso. Sin embargo tampoco se aprecia una mejoría notable en la capacidad de descarga usando este tipo de pilas. Por último si existe una diferencia apreciable en el perfil de la superficie libre usando las pilas desplomadas y tampoco se presenta una sobre elevación muy grande del agua frente a la nariz de la pila.

## REFERENCIAS

1. Rangel, M J , " Diseño de pilas para vertedores " ,  
Trabajo para obtener el grado de Maestro en Ingeniería  
División de estudios de Posgrado, Facultad de  
Ingeniería , UNAM , México 1988 .
2. Chow, V T , " Hidráulica de los Canales Abiertos " ,  
Ed Diana , México 1990 .
3. Escande, L , " Investigaciones sobre las grandes obras de  
evacuación de las crecientes " , Ingeniería  
Hidráulica en México , vol XII , No 4 ,  
octubre - diciembre , 1959 .
4. U S Bureau of Reclamation , " Diseño de Presas Pequeñas " ,  
Ed CECSA , México 1982 .
5. Sotelo, G , " Hidráulica General (vol I ) " ,  
Ed Limusa , México 1989 .
6. Creager, W P , Justin, J D and Hinds, J , " Engeneering  
for dams " , John Wiley and Sons Inc , New York 1950 .
7. Torres, F , " Obras Hidráulicas " , Ed Limusa , México 1980 .